UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LORENA DURAU CARLOTO

EFEITO DA SÍLICA DE CASCA DE ARROZ E DO TIPO DE CIMENTO NA ECOEFICIÊNCIA DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND USANDO DADOS DE RESISTÊNCIA E DURABILIDADE

CURITIBA

2024

LORENA DURAU CARLOTO

EFEITO DA SÍLICA DE CASCA DE ARROZ E DO TIPO DE CIMENTO NA ECOEFICIÊNCIA DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND USANDO DADOS DE RESISTÊNCIA E DURABILIDADE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Carloto, Lorena Durau
Efeito da sílica de casca de arroz e do tipo de cimento na ecoeficiência do concreto de cimento portland usando dados de resistência e durabilidade / Lorena Durau Carloto. – Curitiba, 2024.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Marcelo Henrique Farias de Medeiros

1. Concreto. 2. Resistência de materiais. 3. Ecoeficiência. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Medeiros, Marcelo Henrique Farias de. IV . Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **LORENA DURAU CARLOTO** intitulada: **Efeito da sílica de casca de arroz e do tipo de cimento na ecoeficiência do concreto de cimento Portland usando dados de resistência e durabilidade**, sob orientação do Prof. Dr. MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 16 de Novembro de 2023.

Assinatura Eletrônica
06/12/2023 17:28:30.0
MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
07/12/2023 09:33:51.0
MÔNICA BATISTA LEITE
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA)

Assinatura Eletrônica
06/12/2023 17:08:13.0
ANDRESSA GOBBI
Avaliador Externo (null)

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 332250
Para autenticar este documento/assinatura, acesse https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp e insira o codigo 332250

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, minha gratidão a Deus por sempre direcionar minha caminhada, conceder a oportunidade de realizar sonhos, tornar tudo possível.

Ao meu esposo Murillo Henrique Lima dos Santos, pelo apoio em todos os momentos difíceis, compreensão, dedicação, pela presença e amor. Aos meus pais, Luciane Aparecida Durau Carloto e Benedito Carloto, pelo tamanho esforço que sempre empregaram para que eu fosse mais longe; por me ensinarem tanto, pelo cuidado e encorajamento constantes, pela grande inspiração. Ao meu irmão, Felipe Durau Carloto, pelo companheirismo e parceria irrestritos. Aos meus avós, Lina Leal Durau (*in memorian*) e Ovidio Durau, que sempre intercederam por mim e me abraçaram forte sempre que precisei. Aos meus sogros, Lucimara de Fátima Lima dos Santos e Elcio Domingos dos Santos, à minha cunhada, Amanda Muriele Lima dos Santos, pelo carinho sempre.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros, pelo conhecimento compartilhado, paciência, disponibilidade, diretrizes assertivas, contribuições inestimáveis. À banca, composta pela Profª. Drª. Mônica Batista Leite e Profª. Drª. Andressa Gobbi, pelas ricas colaborações. Aos colegas Gustavo Bortolan Rivarola e Emanoel Cunha Araújo, pelo suporte e cooperação. À técnica de laboratório Vivianne, pela ajuda e gentileza de sempre. À equipe do LACTEC, pelo auxílio no corte de corpos de prova. À Companhia de Cimentos Itambé pela cessão dos cimentos necessários à produção dos concretos estudados.

“Ora, Àquele que é capaz de fazer infinitamente mais do que tudo o que pedimos ou pensamos, de acordo com o seu poder que atua em nós”.

Efésios 3:20

RESUMO

A emissão de poluentes na atmosfera (a exemplo do CO_2) na produção de insumos para a construção civil é reconhecidamente significativa e onerosa. A demanda por infraestrutura requer maior produtividade desse setor; sendo que todo o processo, desde a extração da matéria-prima, produção e transporte até os locais de utilização, gera poluentes. A fim de minimizar esses impactos, já foram propostas várias alternativas, ainda não suficientes. Tem-se buscado resultados para mitigação das emissões de dióxido de carbono na atmosfera por meio de substituições do teor de cimento Portland empregado na produção de concreto, uso de materiais reciclados, aplicações racionalizadas dos materiais envolvidos na construção civil. Estabelecer índices de estudo que contribuam para o entendimento e otimização dos processos é de extrema importância nesse contexto, em que a temática da ecoeficiência do concreto ganha notoriedade; considerando esses índices, podem ser estudados materiais que otimizem o desempenho da estrutura. Aliado a isso, tem-se que estruturas duráveis também podem contribuir para a melhoria das emissões da indústria, uma vez que essa estrutura em boas condições pode não ser demolida, o que ocorreria caso uma nova edificação fosse concebida em prol da segurança e habitabilidade. Dessa forma, a compreensão dos processos de degradação, e reconhecimento de técnicas que visem identificá-los, é imprescindível. Há indicadores que correspondem à durabilidade e os respectivos ensaios evidenciam características do concreto que subsidiam análises da relação entre a microestrutura com a entrada e eventual propagação de agentes deletérios. O entendimento da vida útil das estruturas facilita diagnósticos e direciona a escolha de procedimentos de recuperação de estruturas. O objetivo deste trabalho é explorar a ecoeficiência do concreto, observando o desempenho quanto a resistência à compressão e durabilidade para idades de 28 e 91 dias, com cimentos CPV-ARI, CPIV, CPV-ARI com adição de 10% e 20% de pozolana (sílica de casca de arroz) e CPII-F. A ecoeficiência e durabilidade serão aferidas por meio de indicadores. O método experimental foi escolhido pelo controle que se tem das variáveis envolvidas, e que buscam representar a realidade da fabricação do concreto. Para o traço com maior substituição de cimento Portland por sílica de casca de arroz, houve melhora do desempenho nos ensaios. Verificou-se a incorporação de sílica de casca de arroz contribuiu com a otimização das propriedades relacionadas à resistência mecânica e durabilidade.

Palavras-chave: Concreto. Durabilidade. Ecoeficiência. Sílica de casca de arroz. Resistência mecânica. Indicadores.

ABSTRACT

The emission of pollutants into the atmosphere (such as CO_2) in the production of inputs for construction is recognized as significant and costly. The demand for infrastructure requires greater productivity in this sector; and the entire process, from extraction of raw materials, production and transportation to places of use, generates pollutants. In order to minimize these impacts, several alternatives have already been proposed, but they are not yet sufficient. Results have been sought to mitigate carbon dioxide emissions into the atmosphere by replacing the Portland cement content used in concrete production, using recycled materials, and rationalized applications of materials involved in civil construction. Establishing study indices that contribute to the understanding and optimization of processes is extremely important in this context, in which the topic of concrete eco-efficiency is gaining notoriety; Considering these indices, materials can be studied that optimize the structure's performance. In addition to this, durable structures can also contribute to improving industry emissions, since this structure in good condition may not be demolished, which would happen if a new building was designed for safety and habitability. Therefore, understanding the degradation processes, and recognizing techniques that aim to identify them, is essential. There are indicators that correspond to durability and the respective tests highlight characteristics of the concrete that support analyzes of the relationship between the microstructure and the entry and eventual propagation of harmful agents. Understanding the useful life of structures facilitates diagnoses and guides the choice of structure recovery procedures. The objective of this work is to explore the eco-efficiency of concrete, observing the performance in terms of compressive strength and durability for ages of 28 and 91 days, with cements CPV-ARI, CPIV, CPV-ARI with the addition of 10% and 20% pozzolan (rice husk silica) and CPII-F. Eco-efficiency and durability will be measured using indicators. The experimental method was chosen due to the control it has over the variables involved, and which seek to represent the reality of concrete manufacturing. For the mix with greater replacement of Portland cement by rice husk silica, there was an improvement in performance in the tests. The incorporation of rice husk silica contributed to the optimization of properties related to mechanical resistance and durability.

Keywords: Concrete. Durability. Eco-efficiency. Rice husk sílica. Mechanical strength. Indicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - EMISSÕES CUMULATIVAS DO PROCESSO PRODUTIVO DO CONCRETO POR REGIÃO DO MUNDO EM 2012 24
Figura 2 - CONCENTRAÇÃO DE CO_2 NA ATMOSFERA DESDE 1800 24
Figura 3 - MAIORES PRODUTORES DE CIMENTO (MILHÕES DE TONELADAS) 25
Figura 4 - PARTICIPAÇÃO REGIONAL BRASILEIRA NA PRODUÇÃO DE CIMENTO 25
Figura 5 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO VERSUS CONSUMO TOTAL DE AGLOMERANTE 29
Figura 6 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO VERSUS EMISSÕES DE CO_2 30
Figura 7 - INTENSIDADE DO LIGANTE (*bi*) VERSUS RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS PARA DADOS BRASILEIROS (A) E DADOS INTERNACIONAIS (B) 30
Figura 8 - IMAGEM DE FRAGMENTOS DE ESQUELETOS- CINZA DE CASCA DE ARROZ 38
Figura 9 - RESISTÊNCIA MECÂNICA – RESULTADOS PARA 07, 28 E 91 DIAS ... 40
Figura 10 - SISTEMATIZAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL 47
Figura 11 - ESQUEMA DO EXPERIMENTO INDICANDO OS TEMPOS DOS ENSAIOS EM RELAÇÃO AO MOMENTO DA MOLDAGEM 51
Figura 12 - ORGANIZAÇÃO DE AMOSTRAS POR PROPORÇÃO DE MISTURA E IDADE DE CURA DO CONCRETO PARA EXPERIMENTAÇÃO 51
Figura 13 - DIFRATOGRAMA DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ 54
Figura 14 - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS 54
Figura 15 - CURVA GRANULOMÉTRICA- AGREGADO GRAÚDO | AGREGADO MIÚDO 55
Figura 16 - PRENSA INSTRON, NÚMERO DE SÉRIE 23300P-0017 | 315. ORDEM 20888, CAPACIDADE 250KN, MODELO AC6.08 57
Figura 17 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MONTAGEM DO ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE (A) E CORPO DE PROVA APÓS O ENSAIO (B). 58
Figura 18 - FOTOS DA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE 58

Figura 19 - CONFIGURAÇÃO DO APARATO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE 59
Figura 20 - REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO – BALANÇA HIDROSTÁTICA.....61
Figura 21 - ESQUEMA DO MÉTODO DE QUATRO PONTOS DE WENNER.....61
Figura 22 - AFERIÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA COM EQUIPAMENTO RESIPOD.....63
Figura 23 - DETERMINAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA DO CONCRETO.....64
Figura 24 - APARATO MEDIÇÃO REV.....66
Figura 25 - SERRA UTILIZADA NO CORTE DOS CORPOS DE PROVA.....67
Figura 26 - FATIAS DOS CORPOS DE PROVA APÓS CORTE E IDENTIIFICAÇÃO 67
Figura 27 - FATIAS DO CORPO DE PROVA NO INTERIOR DO DESSECADOR DURANTE O A PREPARAÇÃO PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS 68
Figura 28 - ETAPA DE MANUTENÇÃO NO VÁCUO NO DESSECADOR- PROCESSO DE SATURAÇÃO DAS FATIAS DE CONCRETO PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS POR MIGRAÇÃO 68
Figura 29 - ESQUEMA DA MONTAGEM DAS CÉLULAS PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS- ARRANJO EXPERIMENTAL DA CÉLULA DO TESTE DE MIGRAÇÃO DE CLORETO.....69
Figura 30 - MONTAGEM DAS CÉLULAS PARA OS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS.....69
Figura 31 - PREPARO DAS CÉLULAS.....70
Figura 32 - MONTAGEM DO ENSAIO.....70
Figura 33 - DISPOSIÇÃO PARA INÍCIO DAS LEITURAS DO ENSAIO 71
Figura 34 - DIAGRAMA DE PRESSÕES ASSUMIDO PELO MÉTODO DE TORRENT ONDE A PRESSÃO INTERNA DA CÂMARA (P) É MENOR QUE A PRESSÃO ATMOSFÉRICA (PA) DURANTE FLUXO.....72
Figura 35 - EQUIPAMENTO TORRENT EM OPERAÇÃO.....73
Figura 36 - DIAGRAMA OPERACIONAL - TORRENT.....74

Figura 37 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - 28 E 91 DIAS - 05 TRAÇOS 76
Figura 38 - RESULTADOS MÉDIOS DA ABSORÇÃO POR IMERSÃO - IDADES DE 28 DIAS E 91 DIAS 80
Figura 39 - ABSORÇÃO CAPILAR – LEITURA 72h – 28 DIAS 81
Figura 40 - ABSORÇÃO CAPILAR – LEITURA 72h – 91 DIAS 82
Figura 41 - RESULTADOS MÉDIOS DAS AMOSTRAS - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE – 28 DIAS.....82
Figura 42 - RESULTADOS MÉDIOS ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE – 91 DIAS 83
Figura 43 - EVOLUÇÃO DA REV AO LONGO DO TEMPO PARA AS CINCO PROPORÇÕES DE MISTURA, FREQUÊNCIA DE 700 Hz NO GERADOR DE FUNÇÕES (FONTE DE TENSÃO GERANDO SINAIS DE ONDA SENOIDAL COM AMPLITUDE DE ONDA IGUAL A 20 V) 84
Figura 44 - EVOLUÇÃO DA RES AO LONGO DO TEMPO PARA AS CINCO PROPORÇÕES DE MISTURA 87
Figura 45 - COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS DE PASSAGEM DE CARGA PASSANTE PARA OS CINCO TRAÇOS - ENSAIOS AOS 28 E 91 DIAS.....91
Figura 46 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE - KT - PARA OS TRAÇOS AOS 28 E 91 DIAS 93
Figura 47 - CORRELAÇÃO ENTRE RES X REV – 28, 56 E 91 DIAS 95
Figura 48 - CORRELAÇÃO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ABSORÇÃO POR IMERSÃO - 28 E 91 DIAS.....96
Figura 49 - CORRELAÇÃO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE - 28 E 91 DIAS 97
Figura 50 - CORRELAÇÃO – ABSORÇÃO POR IMERSÃO E POR CAPILARIDADE- 28 E 91 DIAS 98
Figura 51 - CORRELAÇÃO ENTRE RES X RC – 28 E 91 DIAS 99
Figura 52 - CORRELAÇÃO ENTRE REV X RC – 28 DIAS.....100
Figura 53 - CORRELAÇÃO ENTRE RES X ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE ...101
Figura 54 - CORRELAÇÃO ENTRE RES X ABSORÇÃO POR IMERSÃO.....101
Figura 55 - CORRELAÇÃO ENTRE PERMEABILIDADE AO AR X RES.....102

Figura 56 - CORRELAÇÃO ENTRE RES X RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS 103
Figura 57 - CORRELAÇÃO ENTRE CARGA PASSANTE E REV – 28 E 91 DIAS. 104
Figura 58 - RC X CARGA TOTAL PASSANTE – 28 E 91 DIAS..... 105
Figura 59 - RC X PERMEABILIDADE AO AR – 28 E 91 DIAS 105
Figura 60 - CORRELAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO CAPILA R E PERMEABILIDADE AO AR- 28 E 91 DIAS 106
Figura 61 - INTENSIDADE DE LIGANTE – 28 DIAS 109
Figura 62 - INTENSIDADE DE LIGANTE – 91 DIAS 109
Figura 63 - CORRELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE LIGANTE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 111
Figura 64 - INTENSIDADE DE CO_2 – 28 DIAS 111
Figura 65 - INTENSIDADE DE CO_2 – 91 DIAS 112
Figura 66 - CORRELAÇÃO INTENSIDADE DE CO_2 E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 112
Figura 67 - INTENSIDADE DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS – 28 DIAS..... 114
Figura 68 - INTENSIDADE DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS – 91 DIAS..... 114
Figura 69 - INTENSIDADE DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 115
Figura 70 - INTENSIDADE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA - REV – 28 DIAS..... 116
Figura 71 - INTENSIDADE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA - RES – 28 DIAS..... 116
Figura 72 - INTENSIDADE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA - REV – 91 DIAS..... 117
Figura 73 - INTENSIDADE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA - RES – 91 DIAS..... 117
Figura 74 - DADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA – CURVA RESISTÊNCIA MECÂNICA – INTENSIDADE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA..... 118
Figura 75 - DADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL – CURVA RESISTÊNCIA MECÂNICA – INTENSIDADE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL 118
Figura 76 - INTENSIDADE DE PERMEABILIDADE AO AR – 28 DIAS 120
Figura 77 - INTENSIDADE DE PERMEABILIDADE AO AR – 91 DIAS 120
Figura 78 - CORRELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE PERMEABILIDADE AO AR E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – 28 E 91 DIAS..... 121

Figura 79 - INTENSIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE – 28 DIAS.....121
Figura 80 - INTENSIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE – 91 DIAS.....122
Figura 81 - CORRELAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO CAPILAR E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 122
Figura 82 - INTENSIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO – 28 DIAS 123
Figura 83 - INTENSIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO – 91 DIAS 123
Figura 84 - CORRELAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 124
Figura 85 - INTENSIDADE DO ÍNDICE DE VAZIOS– 28 DIAS 125
Figura 86 - INTENSIDADE DO ÍNDICE DE VAZIOS– 91 DIAS 125
Figura 87 - CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICE DE VAZIOS E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - ÁREA, PRODUTIVIDADE E PRODUÇÃO TOTAL DE ARROZ, POR REGIÕES DO BRASIL....36
Tabela 2 - PROBABILIDADE DE CORROSÃO CONFORME RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO....44
Tabela 3 - PROPORÇÕES DAS MISTURAS- SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND EM VOLUME....48
Tabela 4 - PROTOCOLOS EXPERIMENTAIS....50
Tabela 5 - TIPO DE ENSAIO, QUANTIDADE DE AMOSTRAS, FORMA E DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA....50
Tabela 6 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS CIMENTOS....52
Tabela 7 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS CIMENTOS....52
Tabela 8 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DA SÍLICA DE CASCA DE ARROZ....53
Tabela 9 - FATORES DE FORMA PARA DIFERENTES FORMATOS DE AMOSTRAS E DISTÂNCIAS ENTRE ELETRODOS....62
Tabela 10 - CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA COBERTURA DO CONCRETO SEGUNDO KT....74
Tabela 11 - RESUMO DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS....80
Tabela 12 - DIFERENÇAS PERCENTUAIS DOS TRAÇOS ENSAIADOS À REV EM RELAÇÃO AO TRAÇO DE REFERÊNCIA (TCPV)....85
Tabela 13 - DIFERENÇAS PERCENTUAIS DOS TRAÇOS ENSAIADOS À RES EM RELAÇÃO AO TRAÇO DE REFERÊNCIA (TCPV)....88
Tabela 14 - COEFICIENTE kT – QUALIDADE DA COBERTURA DO CONCRETO – PERMEABILIDADE AO AR- MÉTODO TORRENT....93
Tabela 15 - INTERPRETAÇÃO DOS VALORES DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO R....94
Tabela 16 - RESUMO DAS CORRELAÇÕES ENCONTRADAS....107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT..... Associação Brasileira de Normas Técnicas

CCA..... Cinza de casca de arroz

CPs ..... Corpos de prova

CPV – ARI..... Cimento Portland de alta resistência inicial

CPII – F ..... Cimento Portland composto com material carbonático

CPIV – 32..... Cimento Portland pozolânico

SCA..... Sílica de casca de arroz

NBR..... Norma Brasileira

IPCC..... *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

$°\mathrm{C}$.....Grau Celsius

A.....Ampére

m.....Mili (10^{-3})

ρ.....Resistividade elétrica superficial $(\Omega\mathrm{cm})$

Ω.....Ohm

MPa.....Mega Pascal

$\mathrm{a/c}$.....Relação água/cimento

V.....Volt

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 18

1.1. PROBLEMA 20

1.2. OBJETIVOS 20

1.2.1. OBJETIVO GERAL 20

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 21

1.3. JUSTIFICATIVA 21

2. REVISÃO DE LITERATURA 23

2.1. ECOEFICIÊNCIA 23

2.1.1. POZOLANAS EM GERAL 32

2.1.2. SÍLICA DE CASCA DE ARROZ 34

2.2. DURABILIDADE 40

2.2.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA 43

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL 47

3.1. VARIÁVEIS DE ESTUDO 48

3.1.1. VARIÁVEIS INDEPENDENTES 48

3.1.1.1. PROPORÇÕES DE MISTURA 48

3.1.2. VARIÁVEIS DEPENDENTES 49

3.1.3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS 49

3.2. MATERIAIS 52

3.2.1. CIMENTOS 52

3.2.2. SÍLICA DE CASCA DE ARROZ 53

3.2.3. AGREGADOS 54

3.2.4. ADITIVO 55

3.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO 55

3.3.1. PRODUÇÃO DO CONCRETO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA 55

3.3.2. PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS - RESISTÊNCIA MECÂNICA E DURABILIDADE....56

3.3.2.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO....56

3.3.2.2. ABSORÇÃO DE ÁGUA NO CONCRETO....57

3.3.2.3. RESISTIVIDADE ELÉTRICA....61

3.3.2.4. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS....66

3.3.2.5. PERMEABILIDADE AO AR....71

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO....76

4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO....76

4.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA (REV)....84

4.3. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL (RES)....86

4.4. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS....90

4.5. PERMEABILIDADE AO AR....92

4.6. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E POROSIDADE....78

4.7. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE....81

4.8. CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS....94

4.8.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL (RES) X RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA (REV)....94

4.8.2. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 96

4.8.3. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO....98

4.8.4. RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO....100

4.8.5. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL (RES) X ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE....100

4.8.6. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL (RES) X ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO....101

4.8.7. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL (RES) X PERMEABILIDADE AO AR 102

4.8.8. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL (RES) X RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS 102

4.8.9. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 97

4.8.10. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO X ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE 97

4.8.11. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS X REV 104

4.8.12. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO X RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS 104

4.8.13. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO X PERMEABILIDADE AO AR 105

4.8.14. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE X PERMEABILIDADE AO AR 106

4.8.15. RESUMO 107

4.9. AVALIAÇÃO QUANTO À ECOEFICIÊNCIA DOS CONCRETOS 107

4.9.1. CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE ECOEFICIÊNCIA 107

4.9.1.1. INTENSIDADE DE LIGANTE (*bi*) 109

4.9.1.2. INTENSIDADE DE CO_2 (c*i*) 111

4.9.1.3. INTENSIDADE DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS (*bm*) E INTENSIDADE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA (*br*) 113

4.9.1.4. INTENSIDADE DE PERMEABILIDADE AO AR (*bperm*), INTENSIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (ac), INTENSIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO (ai), ÍNDICE DE VAZIOS 119

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 127

5.1. CONCLUSÕES 127

5.2. ARTIGOS EM DESENVOLVIMENTO DURANTE O MESTRADO 128

5.3. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 129

REFERÊNCIAS 130

1. INTRODUÇÃO

O cimento combinado com água e agregados minerais é a segunda substância mais utilizada no mundo, constituindo uma proporção substancial do ambiente construído. É um insumo fundamental na cadeia produtiva da indústria da construção civil, imprescindível ao desenvolvimento da infraestrutura dos países (SCRIVENER, *et al*., 2018; MACHADO, 2020).

Esse amplo uso se deve a características como resistência à água, facilidade de moldagem de diversas formas e tamanhos, valor acessível, condições de manutenção (que são melhores em comparação a outros materiais), resistência ao fogo, resistência a ciclos de carregamento e descarregamento, além de excelentes propriedades mecânicas e de durabilidade (MEYER, 2009; MEHTA; MONTEIRO, 2008). O concreto é um material de engenharia que pode ser projetado para satisfazer quase qualquer conjunto razoável de especificações de desempenho (MEYER, 2009). Ademais, é largamente disponível no mercado, em variados lugares do mundo.

Atreladas aos grandes volumes desse material que são produzidos, estão intrínsecas as emissões de CO_2 por parte da indústria do cimento, que são consideradas um problema com implicações ambientais (MACHADO, 2020). Embora o cimento represente apenas 10 a 15% do peso dos constituintes do concreto, é a principal fonte do impacto ambiental causado pela grande escala de uso do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Em países em desenvolvimento, as demandas envolvem o concreto de maneira significativa, pois o crescimento da população está diretamente relacionado à necessidade de infraestrutura (MALHOTRA, 2005; SHAFIGH *et al.,* 2014). Saneamento básico, habitação, transporte, energia e telecomunicações são essenciais às comunidades (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2022). Para que sejam executadas rodovias, usinas hidrelétricas, portos, aeroportos, redes de distribuição de água e tratamento de esgoto, coleta de águas pluviais e sistemas de transmissão de energia, a indústria da construção é altamente solicitada.

Vastas quantidades de recursos naturais, água e energia são necessárias para produzir bilhões de toneladas de cimento Portland requeridas por ano (MEYER, 2009). Complementarmente, sabe-se que a produção de cada tonelada desse cimento libera 534 kg de CO_2, além dos resíduos de construção e demolição gerados (SNIC, 2019).

Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), as emissões antropogênicas líquidas globais dos gases do efeito estufa durante a década compreendida entre 2010 a 2019 foram maiores que qualquer outra registrada na história humana. Desde 2010, essas emissões cresceram atingindo o valor de 59 ± 6,6 Gt de CO_2.

A indústria do cimento corresponde, a nível mundial, com cerca de 7% de todas as emissões geradas pelo homem (SNIC, 2019). A preservação ambiental passou a ser vista como fundamental para a continuidade do crescimento econômico, possibilitando a manutenção dos recursos naturais indispensáveis à industrialização. No campo das construções, o consumo de materiais e energia ainda é expressivo, assim como a geração de gases do efeito estufa e resíduos diversos (BATTAGIN, 2015).

Uma forma de se contribuir com o ambiente é atentando para a durabilidade das estruturas. Estruturas mais duráveis contribuem no sentido de que os usuários podem usufruir do que essas oferecem por mais tempo, dispensando-se a necessidade de demolição (que geraria resíduos) e construção de uma nova edificação (que utilizaria mais recursos naturais).

A indústria da construção civil já vem atuando no sentido de se buscarem alternativas a fim de que sejam minimizadas as emissões de dióxido de carbono (OLIVEIRA *et al.,* 2014). Tem sido considerado o uso de adições ou substitutos de clínquer por adições minerais, combustíveis alternativos, eficiência térmica e elétrica, tecnologias inovadoras e emergentes, potencial de mitigação da cadeia de construção, captura e armazenamento de dióxido de carbono (HUMPHREYS, MAHASENAN, 2002; DAMINELI, 2013; SCRIVENER *et al*., 2018; SNIC, 2019), utilização de concretos produzidos com agregados reciclados (BATTAGIN, 2015; SILVA; CAPUZZO, 2020).

Entretanto, a substituição isolada do clínquer por adições minerais, por exemplo, não confere ao concreto a característica de baixo impacto ambiental (MACHADO, 2020). Estratégias convencionais e independentes para o abrandamento dessas emissões (visando efeito mitigatório) não são suficientes para que se atinjam níveis satisfatórios. Mesmo que exista uma contribuição na melhoria de emissões de CO_2, em um primeiro momento, a necessidade de aumento da produção de cimento para atendimento à demanda proporcionará aumento das emissões totais, também (DAMINELI, 2013; MACHADO, 2020). O acréscimo das emissões de poluentes com

o aumento da produção do cimento pode ocorrer mais rapidamente do que a velocidade na qual as emissões são reduzidas (DAMINELI *et al.*, 2010).

Diante disso, são importantes os indicadores (baseados em propriedades) que facultem a comparação de concretos e que determinem diretrizes para que se alcance a ecoeficiência no consumo de ligantes; sendo que, quanto maior for a intensidade de ligante, maior o teor de ligantes necessário para que seja realizada a mesma função, menor será a ecoeficiência do concreto (MACHADO, 2020).

Entender o meio em que a estrutura está inserida e identificar a quais agentes deletérios estará submetida pode contribuir na especificação do material a ser utilizado e a preservar sua durabilidade. O objetivo deste trabalho é avaliar a ecoeficiência do concreto, qual a interferência da substituição parcial de cimento Portland por sílica de casca de arroz e de que forma a durabilidade e resistência à compressão estão relacionadas.

1.1. PROBLEMA

O crescimento econômico proporcionou a formação de um contexto do qual emerge a necessidade de infraestrutura urbana, que passa a compor o plano de fundo da sociedade organizada nas mais diversas atividades. As construções abrigam vidas humanas e proporcionam o desenvolvimento de variadas funções sociais. Fato é que a demanda por novos espaços construídos está atrelada à necessidade de materiais de construção, sendo o cimento Portland, matéria-prima do concreto, um dos elementos de destaque nessa conjuntura. A produção do concreto emite diversos poluentes na atmosfera, como o CO_2, que gera a preocupação com a temática da ecoeficiência. Ainda, há de se considerar como importantes as características que esse produto final conferirá às estruturas, como resistência e durabilidade.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é estudar o efeito da sílica de casca de arroz e do tipo de cimento na resistência à compressão e em propriedades relacionadas com a durabilidade do concreto, abordando a questão da ecoeficiência.

1.2.2. Objetivos específicos

- Estudar a relação da resistividade elétrica superficial com a resistividade elétrica volumétrica das amostras para as idades de 28, 56 e 91 dias de idade;
- Investigar se existe relação entre a absorção de água por capilaridade e a absorção por imersão das amostras para as idades de 28 e 91 dias;
- Avaliar o efeito da adição de sílica de casca de arroz e do tipo de cimento na resistência à penetração de cloretos e permeabilidade ao ar de amostras com 28 e 91 dias de idade;
- Analisar a relação entre a ecoeficiência do concreto e a resistência mecânica.
- Desenvolver e testar parâmetros que relacionem a ecoeficiência do concreto com alguns parâmetros relacionados com a durabilidade do concreto;
- Investigar o efeito da adição de sílica de casca de arroz e do tipo de cimento na ecoeficiência do concreto.

1.3. JUSTIFICATIVA

Segundo Doyle *et al.* (2009), o crescimento da população associado ao desenvolvimento da economia de muitos países, em especial os países em desenvolvimento, resultou em um aumento drástico da demanda por infraestrutura. É necessário que o aumento da infraestrutura proporcione um desenvolvimento sustentável em diferentes setores da economia de uma nação.

Para atender a demanda por infraestrutura, a produção de mais materiais de construção é necessária; nesse aspecto, o cimento é o produto de construção manufaturado mais utilizado no planeta (SILVA *et al*., 2015; SCRIVENER *et al.*, 2018). Ademais, segundo o IBGE (2018), há ativas, no mercado brasileiro, 124.522 empresas de construção civil; foram movimentados, naquele ano, para obras e serviços, R$

269.864.462,00, o que por si só já motiva a atenção ao tema abordado por este trabalho.

Estando o mercado da construção civil amplamente demandado, as emissões de poluentes no processo de fabricação do concreto tornam-se um grande problema mundial, já que prejudicam a qualidade do ar e deterioram o meio ambiente. A indústria da construção pode, em muito, contribuir no tocante às edificações quando considerada a ecoeficiência do concreto. Bianchini (2010), por exemplo, aponta que uma possibilidade da minimização de efeitos nocivos ao meio ambiente é pela diminuição do consumo de cimento por unidade de resistência, o que levaria à reduções de emissões de CO_2.

O cimento contém constituintes como o clínquer, gesso e outros materiais suplementares. Desses constituintes, o clínquer é responsável por 65% a 85% da massa global do cimento e 90% a 98% da emissão dos poluentes durante o processo de produção (OLIVEIRA *et al*., 2014; MILLER *et al.,* 2016). Os mesmos autores afirmam que, dependendo da tecnologia empregada no local de fabricação, energia, resistência requerida do concreto, a produção de 1 m³ de concreto produz quantidades variáveis de gases do efeito estufa.

Haja vista a abrangência da construção civil, justifica-se a importância de abordagem do estudo do concreto e as relações que podem ser estabelecidas com a sua ecoeficiência. Este conceito visa promover um monitoramento sobre as emissões de CO_2 na produção do cimento com vista à redução do volume considerado como inerente ao processo. Há a necessidade de que os recursos naturais sejam gerenciados nos processos da construção civil e que haja, também, correto gerenciamento dos poluentes resultantes.

A relevância do desenvolvimento de novas tecnologias para elementos na construção civil e estudo das características dos materiais utilizados como insumos se dá à medida em que os recursos naturais explorados no meio ambiente tornam-se cada vez mais escassos, levando a impactos ambientais mais significativos (IBGE/ PNAD, 2013).

A Engenharia é intrínseca à criação de tecnologias e melhoria das condições de vida. Entende-se que, na concepção de concretos ecoeficientes e duráveis, a sociedade será beneficiada. O desafio do desenvolvimento sustentável para a indústria da construção civil converge, também, para a busca de soluções

tecnológicas que viabilizem a destinação dos resíduos como matéria-prima para outros processos (FRANCO, 2015).

Existem indicadores de durabilidade, a exemplo da intensidade de migração de cloretos e intensidade de resistividade elétrica, já propostos na literatura e que auxiliam balizamentos em relação ao desempenho de concreto (MEDEIROS *et al*., 2019). Expandir essas possibilidades de avaliação com novos indicadores pode contribuir para que a ecoeficiência seja melhor avaliada para cada material e possa fornecer critérios de análise frente às diversas possibilidades do desenvolvimento de manifestações patológicas; disso configura-se a grande importância deste estudo, que busca relacionar o parâmetro de maior importância do concreto, resistência à compressão (FARIAS, 2020), à ecoeficiência e durabilidade.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, estão apresentados os principais conceitos relacionados a este estudo.

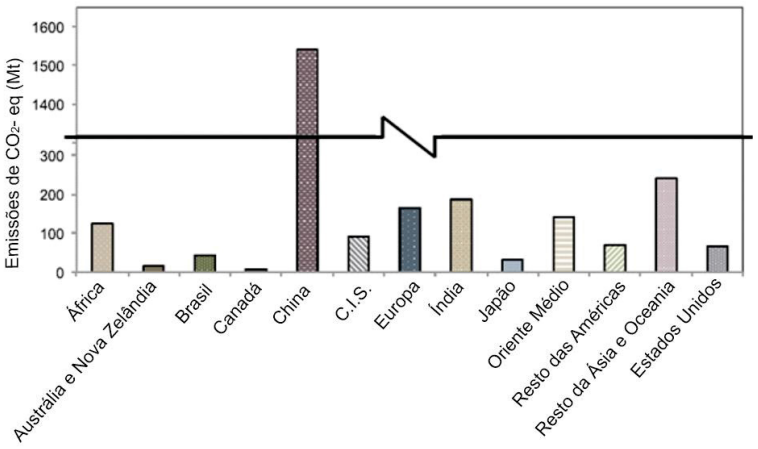
2.1. ECOEFICIÊNCIA

A estimativa é de que cerca de 7% das emissões totais geradas de CO_2 no mundo sejam provenientes do processo de fabricação do cimento (SNIC, 2019). Não somente o processo produtivo do cimento Portland é intenso em água e energia, mas também significativo contribuinte de gases do efeito estufa (MALHOTRA, 2005; MEYER, 2009; DEJA, *et al*., 2010; HILLS *et al.,* 2016). Segundo dados do SNIC (2019), entre 1990 e 2014, as emissões especificas do setor Brasil reduziram de 700 kg de CO_2/tonelada de cimento para 564 kg de CO_2/tonelada de cimento.

O dióxido de carbono (CO_2) está diretamente relacionado ao agravamento do efeito estufa. As influências de outros gases (metano ou óxido nitroso), apesar de contarem com fatores de caracterização mais elevados, são muito menores (JOSA *et al.*, 2007).

A Figura 1 apresenta as emissões cumulativas das emissões advindas da produção do concreto, por região no mundo, baseadas na tecnologia de produção, constituintes do cimento, energia e consumo.

Figura 1 - EMISSÕES CUMULATIVAS DO PROCESSO PRODUTIVO DO CONCRETO POR REGIÃO DO MUNDO EM 2012

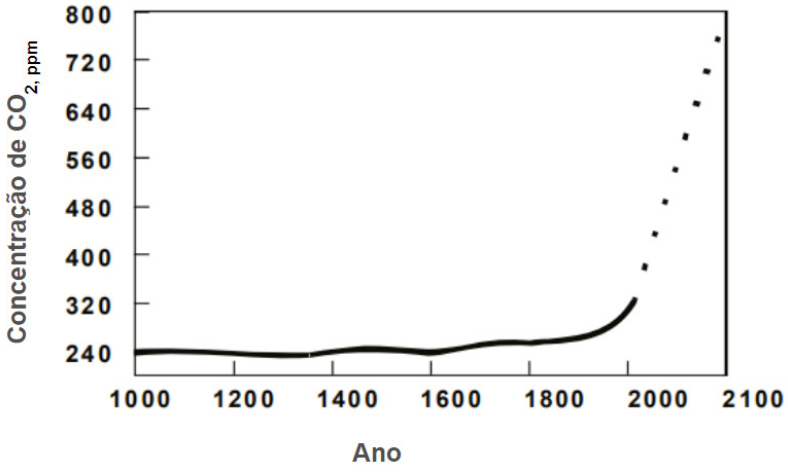


Fonte: Miller *et al.* (2016) - traduzido pela Autora

A concentração de CO_2 vem aumentando constantemente desde a revolução industrial em 1800. Naquela época, a concentração de CO_2 na atmosfera era de 260 ppm, em 1988 a concentração observada no Havaí era de 350 ppm. Sem a adoção de medidas contra esse aumento, a taxa só tende a aumentar drasticamente (MALHOTRA, 2005).

A Figura 2 ilustra a concentração de dióxido de carbono na atmosfera desde 1800, com projeções até 2100.

Figura 2 - CONCENTRAÇÃO DE CO_2 NA ATMOSFERA DESDE 1800



Fonte: Malhotra (2005) - traduzido pela Autora

Com as emissões da indústria da construção civil, é fundamental apostar no desenvolvimento de soluções eficientes que contribuam com o crescimento sustentável desse setor (ROBALO *et al.*, 2021). Dada a importância da ecoeficiência

do concreto, é necessário que se compreenda o contexto em que se insere. A Figura 3 apresenta os maiores produtores de cimento do mundo, com comparativos de produção entre os anos 2013 a 2019.

Figura 3 - MAIORES PRODUTORES DE CIMENTO (MILHÕES DE TONELADAS)

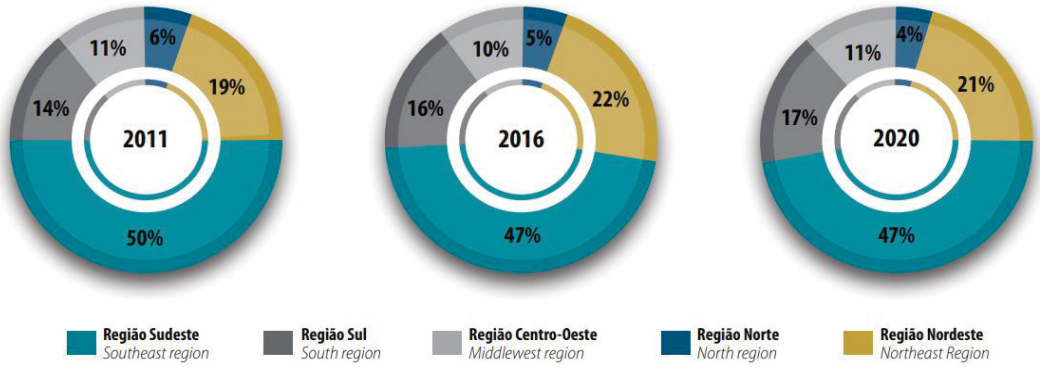
Países/*Country*	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
1. China	2.420,0	2.480,0	2.350,0	2.403,0	2.316,3	2.176,7	2.300,0
2. Índia/*India*	280,0	260,0	270,0	289,3	285,0	327,7	320,0
3. Vietnã/*Vietnam*	58,0	60,5	57,4	77,3	78,8	90,2	97,0
4. Estados Unidos/*U.S.A.*	77,4	83,2	83,4	84,7	86,1	87,8	88,6
5. Indonésia/*Indonesia*	56,0	65,0	65,0	61,3	68,0	70,8	64,2
6. Irã/*Iran*	72,0	65,0	58,6	55,0	54,0	58,0	60,0
7. Turquia/*Turkey*	72,7	71,2	71,4	75,4	80,6	72,5	57,0
8. Brasil/*Brazil*	70,2	72,5	66,5	58,2	54,0	53,6	56,6
9. Coréia do Sul/*Rep. of Korea*	47,3	63,2	63,0	56,7	57,9	55,0	56,4
10. Japão/*Japan*	57,4	53,8	55,0	53,4	55,5	55,3	55,2
11. Rússia/*Russia*	72,0	68,4	69,0	55,0	54,7	53,7	54,1
12. México/*Mexico*	34,6	35,0	39,8	42,4	42,8	42,8	47,5
13. Egito/*Egypt*	50,0	50,0	55,0	55,0	53,0	81,2	47,0
14. Arábia Saudita/*Saudi Arabia*	57,0	55,0	55,0	55,9	47,1	42,2	42,2
15. Alemanha/*Germany*	31,5	32,1	31,1	32,7	34,0	33,7	34,2
Total Mundial/*World Total*	**4.180,0**	**4.600,0**	**4.650,0**	**4.100,0**	**4.100,0**	**3.992,0**	**4.168,0**

FONTE: SNIC (2022)

O Brasil possui 91 fábricas produtoras de cimento distribuídas em 80 municípios de 23 estados brasileiros, controladas por 22 grupos industriais (SNIC, 2022). Tem capacidade para geração de 94 milhões de toneladas por ano de cimento. Em 2020, a produção total foi equivalente a 61 milhões de toneladas, gerando 18 mil empregos diretos; consumo per capita equivale a 286 kg/habitante/ano (SNIC, 2022).

A Figura 4 indica a participação regional de produção de cimento no Brasil, comparando-se os anos de 2011, 2016 e 2020.

Figura 4 - PARTICIPAÇÃO REGIONAL BRASILEIRA NA PRODUÇÃO DE CIMENTO



Fonte: SNIC (2022)

Os princípios do desenvolvimento sustentável e edifícios verdes entraram na indústria da construção em ritmo acelerado nos últimos anos, objetivando minimizar

as emissões de poluentes. Hoje existem algumas alternativas como a tentativa de substituição máxima possível do cimento Portland por outros materiais cimentícios (MEYER, 2009; CHRISTOPHER *et al.,* 2017).

Há estratégias consolidadas para redução das emissões de CO_2 resultantes da produção do clínquer, como a substituição do clínquer por adições minerais (a exemplo das pozolanas e escória de alto forno) e aumento da eficiência energética do processo produtivo (DAMINELI *et al*., 2010). Além disso, outras estratégias consolidadas envolvem o uso de combustíveis alternativos, como biocombustíveis e resíduos (DAMINELI *et al*., 2010), sequestro de carbono, uso de novos aglomerantes, uso de novas matérias-primas para produção de clínquer, aumento da reatividade no cimento e uso de menos água no traço com mais superplastificantes (MALHOTRA, 2005; DEJA, *et al*., 2010). Também podem ser considerados: a incorporação de agregados reciclados no concreto, uso de barras de aço inoxidáveis em partes críticas da estrutura para torná-las mais duráveis, uso de concreto leve sempre que possível (LEVY; HELENE, 2004; MALHOTRA, 2005; MEYER, 2009).

Segundo Barbosa *et al*. (2013), tem-se verificado um aumento de descarte de rejeitos sólidos, bem como os problemas advindos da exaustão de matérias-primas naturais, e isto vem impulsionando os estudos sobre o aproveitamento de resíduos industriais, reduzindo o seu impacto ambiental e viabilizando a redução de custos.

A valorização dos resíduos industriais em materiais de construção é um dos principais caminhos para avanços no aumento da sustentabilidade (BARBOSA *et al*., 2013; SHAFIGH *et al*., 2014). A ampla disponibilidade de resíduos agrícolas os torna uma opção adequada e confiável para uso como constituintes do concreto, até mesmo como agregados (SARHAT, 2007; SHAFIGH *et al.,* 2014). Há estudos realizados com areias de fundição recicladas, agregados reciclados, material dragado, fibras de carpete recicladas, substratos de cogumelos (MEYER, 2009), óleo de casca de palmeira, casca de côco, espiga de milho, casca de arroz e resíduos de tabaco (SHAFIGH *et al.,* 2014).

A incorporação de resíduos agroindustriais ao concreto, tais como a cinza/ sílica de casca de arroz (com alta reatividade pozolânica), além de ser uma das soluções para o aproveitamento de subprodutos de outros setores, é também considerada eficiente como um material de substituição de parte do cimento Portland, enriquecendo o desempenho do compósito final (BARBOSA *et al*., 2013).

Levy e Helene (2004) estudaram agregados (miúdos e graúdos) recuperados de resíduos de alvenaria e concreto na formulação de novos concretos avaliando as propriedades como a absorção de água, volume total de poros e carbonatação. Esse experimento mostrou que algumas características composicionais do concreto podem ter mais influência na durabilidade do que os aspectos físicos tradicionais.

O uso de bagaço de cana-de-açúcar foi estudado por Berenguer *et al.* (2020), que concluíram a possível substituição de 15% de cimento Portland, não havendo prejuízo à resistência à compressão e à tração. Em se tratando de um resíduo da agroindústria, há nisso uma solução a favor da sustentabilidade, também.

Damineli *et al.* (2010) citam que uma estratégia para reduzir as emissões de CO_2 é melhorar a eficiência do uso do cimento, o que dependeria da capacidade dos fornecedores formularem produtos mais ecoeficientes, e usuários empregarem o material de forma otimizada. Essa alternativa não foi ainda amplamente estudada, mas algumas opções têm sido investigadas como o uso de dispersantes (superplastificantes), empacotamento de partículas mais eficiente, aumento da resistência à compressão, além de combinação de estratégias para a produção de um concreto mais verde.

Contudo, faltam indicadores de performance que possam ser usados por profissionais e organizações que facilmente estabelecessem a eficiência do uso do cimento, já que um conjunto de dados mensuráveis ajudaria a estipular metas viáveis (DAMINELI *et al.*, 2010).

A ecoeficiência pode proporcionar a diminuição do impacto ambiental, redução de resíduos gerados produzidos, diminuição da extração de agregados naturais e das emissões de CO_2 na produção do concreto (ROBALO *et al.*, 2021). Disso, entende-se que a existência de índices matemáticos que delineassem essa ecoeficiência, facilitaria análises dos concretos em questão.

A ecoeficiência do concreto pode ser entendida como uma forma de diminuição dos impactos do uso desse material na execução de obras (MILLER *et al.*, 2016). Em uma abordagem geral, é possível definir a eficiência do concreto em termos do total de aglomerante, do custo total da produção do concreto ou das cargas ambientais impostas para desenvolver uma unidade de performance que seja funcional, medida por um indicador relevante, como a resistência à compressão, flexão e módulo de elasticidade, resistência à carbonatação (DAMINELI *et al.*, 2010).

Na literatura, foram propostos indicadores de ecoeficiência por Damineli *et al*. (2010), identificados por “intensidade de ligante” (Equação 1) e “intensidade de CO_2” (Equação 2). O primeiro fornece a quantidade de ligante necessária para que se atinja uma unidade de MPa de resistência, e pode ser entendido como medida de eficiência do uso de aglomerantes; a intensidade de CO_2 define-se como a forma de se mensurar a quantidade de dióxido de carbono emitida a fim de que se atinja uma unidade de resistência (1 MPa), é o potencial poluidor do material analisado.

$$bi = \frac{b}{p} \tag{01}$$

Onde:

b = é o consumo total de materiais ligantes (kg/m³);

p = requisito de desempenho (na maioria dos casos, p será a resistência à compressão (MPa) aos 28 dias, mas o indicador de desempenho e a idade dependerão da aplicação do concreto).

A Equação (2) refere-se à intensidade de CO_2.

$$ci = \frac{c}{p} \tag{02}$$

Onde:

- *c* é o total de CO_2 (kg/m³) emitido para produzir e transportar todas as matérias-primas de concreto;
- *p (*na maioria dos casos*)* é a resistência à compressão para o cálculo de *ci*.

Os coeficientes *bi* e *ci* incorporam vários fatores: (1) a eficiência da produção de cimento; (2) traço do concreto; e (3) seleção de materiais do concreto, que inclui a natureza e qualidade das matérias-primas (por exemplo, uso de superplastificantes, reatividade do clínquer e dos aditivos minerais utilizados). Quando o valor de *p* nas Equações (1) e (2) é a resistência de projeto do concreto, os índices também são sensíveis à variabilidade da produção do concreto. Consequentemente, esses indicadores permitem avaliar a eficiência de todo o processo. Outros indicadores

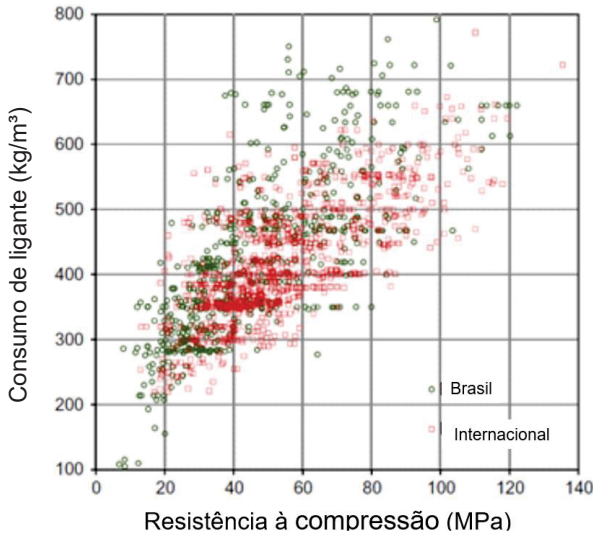
populares como a taxa de reposição de clínquer e a intensidade energética da produção de cimento ou clínquer não são capazes de fornecer uma avaliação tão abrangente (DAMINELI *et al*., 2010).

Combinados, os dois indicadores proporcionam uma avaliação abrangente da eficiência do uso do cimento. A intensidade do ligante (*bi*) indica a eficiência do uso de clínquer e outros substitutos do clínquer. A intensidade de CO_2 (*ci*) permite estimar o potencial de aquecimento global da mistura.

De modo geral, o consumo de ligante tende a aumentar com a resistência à compressão, conforme a Figura 5 apresenta (DAMINELI *et al.*, 2010). No entanto, a dispersão é grande, mostrando que muitos outros fatores estão influenciando a quantidade de aglutinante necessária para fornecer uma determinada resistência à compressão.

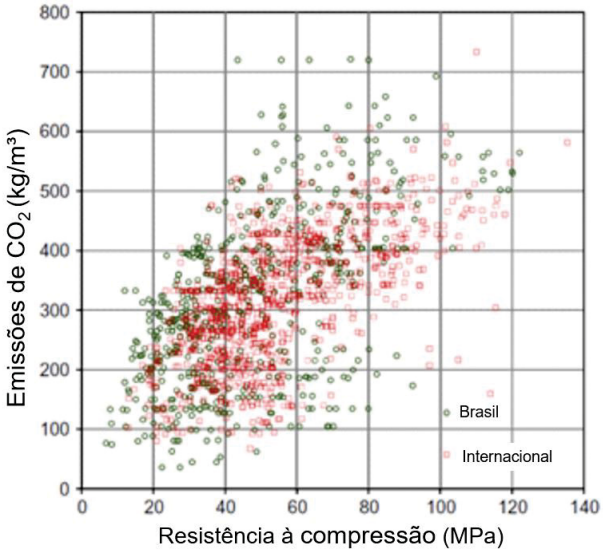
A Figura 6 apresenta as emissões totais de CO_2 (kg/m³) *versus* a resistência à compressão, aos 28 dias. Os resultados mostram uma dispersão comparativamente maior do que os dados de teor total de ligante com emissão total de CO_2 estimada entre 100 e 600 kg/m³.

Figura 5 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO VERSUS CONSUMO TOTAL DE AGLOMERANTE



Fonte: Damineli *et al*. (2010) - traduzido pela Autora

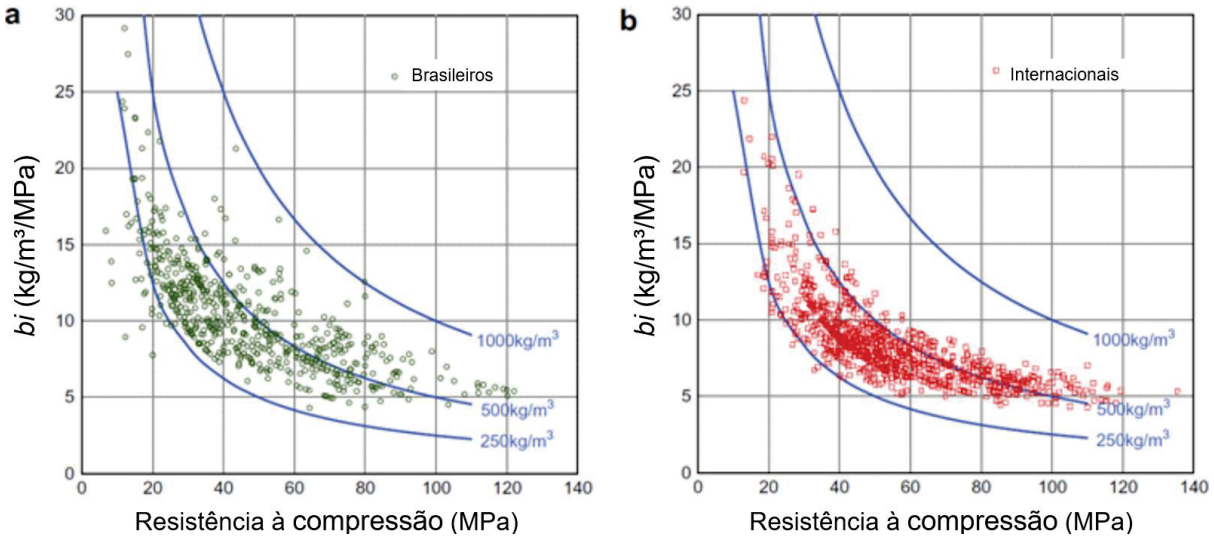
Figura 6 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO VERSUS EMISSÕES DE CO_2



Fonte: Damineli *et al*. (2010) - traduzido pela Autora

A Figura 7 apresenta a intensidade de ligante calculada (*bi*) para dispersão de dados brasileira e internacional. A dispersão diminui à medida que a resistência à compressão aumenta. Não há diferenças significativas nas distribuições produzidos com dados internacionais e brasileiros. As bordas inferiores de ambos os conjuntos de dados são bastante semelhantes, embora uma grande variedade de materiais e métodos de mistura sejam representados. Isso mostra que o indicador *bi* fornece resultados consistentes em diversas situações.

Figura 7 - INTENSIDADE DO LIGANTE (*bi*) VERSUS RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS PARA DADOS BRASILEIROS (A) E DADOS INTERNACIONAIS (B)



Fonte: Damineli *et al.* (2010) - traduzido pela Autora

Scrivener *et al.* (2021) defende, a partir dos estudos de Damineli *et al.* (2010), que há possibilidade de potencial mitigação de CO_2 otimizando o uso do ligante com tecnologias atuais e de baixo consumo de água.

A quantidade de ligante usada para produzir concretos de uma determinada resistência varia enormemente (um fato que é negligenciado). Esta dispersão mostra que existe um potencial substancial para a mitigação de CO_2 simplesmente melhorando a eficiência do uso do cimento (SCRIVENER *et al*., 2021). Scrivener *et al.* (2021) ainda descrevem que a intensidade mínima do ligante é de 5 kg/m^3/MPa para concretos com resistência acima de 50 MPa. Os mesmos autores apresentam que este teor mínimo de ligante reflete a necessidade de partículas finas suficientes para preencher o espaço entre os agregados para garantir um bom comportamento reológico. Para concretos com resistência à compressão de 30 MPa, a intensidade mínima do ligante é de cerca de 8 kg/m^3 MPa, mas a média fica em torno de 12 kg/m³/MPa, uma diferença de 44% (SCRIVENER *et al*., 2021).

A forma mais eficaz de reduzir a dosagem de cimento, sem comprometer a resistência, é selecionar as quantidades de agregados em diferentes frações para otimizar o enchimento, reduzindo o espaço vazio a ser preenchido pela pasta de cimento. Reduzir a dosagem de cimento mantendo boa fluidez e compactação também depende do uso de dispersantes adequados (aditivos) (SCRIVENER *et al*., 2021).

Medeiros *et al.* (2019) acrescentaram indicadores de durabilidade ao estudo de Damineli *et al.* (2010), e concluíram que a especificação de concretos de maior resistência tende a apresentar maior eficiência no uso do cimento em termos de durabilidade, considerando os parâmetros de resistividade elétrica e penetração de cloretos.

O estudo de Soldado *et al.* (2021) caracteriza o comportamento de desempenho de durabilidade em matrizes otimizadas com redução das emissões de carbono. Essa análise permitiu que se observasse a influência de diferentes adições específicas, combinadas com alta compacidade, nas propriedades de durabilidade do concreto em termos de risco de corrosão. Também, foram estabelecidas relações entre a formulação de parâmetros de matrizes e vida útil de serviço de estruturas expostas a carbonatação ou ingresso de cloretos. Neste caso, não houve desenvolvimento, pelos autores, de índices ou indicadores de ecoeficiência, mas sim uma aplicação prática e específica visando estudar a sustentabilidade.

Gurdián *et al*. (2021) avaliaram que as propriedades mecânicas são reduzidas com o aumento das proporções de agregado reciclado e de resíduos usados como substituição na matriz cimentícia, enquanto as propriedades de durabilidade são afetadas apenas pelo aumento na porcentagem de agregados reciclados. Todos os concretos estudados foram considerados adequados para uso como concreto estrutural.

Para Hatami e Amiri (2022) é de importância crucial encontrar maneiras de lidar com os resíduos e incorporá-los nas misturas de concreto para substituir o cimento (reduzindo o consumo) e proteger o meio ambiente. Mesmo assim, antes que possam ser utilizadas em aplicações práticas, as propriedades do concreto contendo materiais reciclados devem ser investigadas.

2.1.1. Pozolanas em geral

O grupo de materiais cimentícios suplementares (SCMs) compreende elementos que apresentam comportamento hidráulico ou pozolânico (SNELLINGS *et al.*, 2012). Uma pozolana é definida pela ASTM C618 (2022) como material silicoso ou sílico-aluminoso, que isoladamente não tem valor cimentício, mas na forma de finos e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos que possuem propriedades cimentícias (MEHTA, 1987 apud SNELLINGS *et al.,* 2012).

Deve-se notar que a definição de pozolana não confere nenhuma influência sobre a origem do material, apenas sobre sua capacidade de reagir com cal e água. Grande parte das pozolanas naturais é de origem vulcânica, principalmente devido à ampla disponibilidade de rochas vulcânicas em muitos países (SNELLINGS *et al.*, 2012).

Materiais cimentícios suplementares têm sido usados largamente em estudos na substituição parcial do cimento Portland (SNELLINGS, 2012), a exemplo de cinzas volantes, escória de alto forno, pozolanas naturais, cinzas de casca de arroz, sílica ativa e metacaulim (MALHOTRA, 2005; MEYER, 2009).

De fato, a busca de solução para as questões ambientais associadas às emissões de CO_2 da produção do cimento Portland demandam o uso materiais cimentícios suplementares. O uso combinado de superplastificantes e SCMs pode levar à obtenção de concretos de maior desempenho econômico com maior

durabilidade. México e Turquia produzem cimentos Portland pozolânicos com substituição do cimento em níveis em torno de 30% (MALHOTRA, 2005).

No contexto nacional, a NBR 16697 (ABNT, 2018) especifica que a faixa de substituição parcial permitida, em porcentagem de massa, para o cimento CPII-F, é de 11 a 25% de material carbonático; enquanto que, para o cimento CPIV, é de 15 a 50% de material pozolânico e 0 a 10% de material carbonático. O cimento CPV-ARI apresenta 0% de material pozolânico e de 0 a 10% de material carbonático.

A contribuição de reações pozolânicas ou hidráulicas para a resistência do cimento é geralmente desenvolvida em um estágio de cura posterior, dependendo da reatividade do material cimentício suplementar. Na maioria das misturas, são vistas resistências iniciais mais baixas em comparação ao cimento Portland original (SNELLINGS *et al.,* 2012).

Snellings *et al*. (2012), no entanto, especialmente no caso de SCMs de maior finura que o cimento Portland, definem que a diminuição da resistência inicial é geralmente menor do que pode ser esperado com base no fator de diluição. Isso pode ser explicado, por um lado, pela contribuição do efeito filer, no qual pequenos grãos do material cimentício suplementar preenchem o espaço intersticial entre as partículas de cimento, resultando em uma matriz ligante muito mais densa. Por outro lado, os autores explicam que a aceleração das reações de hidratação do clínquer também podem acomodar pelo menos parcialmente a perda de resistência inicial. Em idades de cura posteriores, os cimentos normalmente mostram uma taxa mais alta de desenvolvimento de resistência devido à formação suplementar de produtos das reações pozolânicas ou hidráulicas.

Dependendo da mistura e da atividade do SCM, a resistência máxima pode tornar-se mais alta do que a do cimento Portland original; a velocidade das reações pozolânicas e hidráulicas, principalmente, determina o momento em que a resistência do cimento com a parcela de substituição excede a resistência original do cimento Portland (SNELLINGS *et al.*, 2012).

Uma das principais vantagens dos SCMs, e um dos primeiros incentivos para introduzi-los em cimentos, é a resistência química significativamente aumentada do ligante ao ingresso e ação deletéria de soluções agressivas. A durabilidade melhorada dos ligantes com SCM permite prolongar a vida útil das estruturas, reduz o custo e a necessidade de substituir construções deterioradas (SNELLINGS *et al*., 2012).

Em geral, um dos principais motivos de maior durabilidade em cimentos misturados com SCM é o baixo teor de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) disponível para participar de reações deletérias. Além disso, o maior teor na fase ligante de C-S-H (silicato de cálcio hidratado), com uma razão Ca/Si (cálcio/ silício) reduzida, resulta em distribuições de tamanho de poros mais finas e permeabilidades mais baixas em uma fase C-S-H termodinamicamente mais estável e quimicamente mais resistente, com maior capacidade de ligação de cloro e íons alcalinos (SNELLINGS *et al*., 2012).

2.1.2. Sílica de casca de arroz

A gestão de resíduos sólidos ou subprodutos industriais é um problema ambiental (SANDHU; SIDDIQUE, 2017). O arroz é considerado um dos mais importantes insumos agrícolas, e o beneficiamento desse elemento gera, como subproduto, a casca de arroz que corresponde a cerca de 23% de seu peso (HWANG; CHANDRA, 2002). A queima da casca de arroz produz um resíduo, denominado cinza de casca de arroz; enquanto que a sílica de casca de arroz é um produto industrial. Neste contexto, a sílica de casca de arroz já foi considerada como uma alternativa à produção de sílica ativa (DELLA *et al*., 2002).

As propriedades e características de um material estão ligadas à sua origem e aos métodos e técnicas de sua produção. A casca de arroz é processada a céu aberto ou em condições de incineração em que a temperatura e duração da queima são controladas, o que é um aspecto que diferencia a denominação dada à “cinza de casca de arroz” e à “sílica de casca de arroz” (HWANG; CHANDRA, 2016; PATIL *et al*., 2022).

A queima em campo aberto não é incentivada devido a problemas de poluição, e ao fato de produzir cinzas de casca de arroz de baixa qualidade. O material produzido dessa maneira possui alto teor de carbono que afeta negativamente o desempenho do concreto e também resulta em uma estrutura de forma altamente cristalina e de baixa reatividade (HWANG; CHANDRA, 2016). Para que se atendam alguns requisitos, mantem-se a sílica no estado amorfo, com pouco resíduo de carbono (PATIL *et al*, 2022).

As condições de preparo (o quão finamente é moída), incineração (controle da temperatura, duração da queima) e ambiente de processamento influenciam a qualidade da SCA (CHRISTOPHER *et al*., 2017; Patil *et al*., 2022), Christopher *et al*.

(2017) concluíram que é necessária essa queima controlada para que se produza sílica de casca de arroz e que se possa adicioná-la ao concreto estrutural. A atividade pozolânica do resíduo é fortemente afetada pela temperatura de queima, já que quando monitorada, um material pozolânico ativo pode ser produzido (MEHTA, 1977 apud SHAFIGH *et al.*, 2014),

Em grandes quantidades, a supramencionada cinza é destinada a aterros (prejudiciais ao meio ambiente), por isso seu uso alternativo no concreto torna-se importante (BIXAPATHI; SARAVANAN, 2022). De acordo com Malhotra (2005), quase não há tecnologias que possam reduzir as emissões de CO_2 durante a fabricação do cimento Portland. A resposta, então, segundo o autor, estaria na diminuição do clínquer e nas substituições com uso de cinza volante e outros materiais de cimentação suplementares como escória de alto forno e cinza de casca de arroz.

Em relação ao uso como substituto do cimento, as adições minerais afetam o desempenho da pasta, argamassa e concreto devido a efeitos físicos e químicos. Os efeitos físicos estão principalmente associados à sua influência nas características de empacotamento da mistura, que dependem do tamanho, forma e textura das partículas. Os efeitos químicos estão associados à sua capacidade de fornecer compostos siliciosos/aluminosos que irão reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio na presença de água (CORDEIRO *et al.*, 2008).

A reatividade determinará qual será a interação entre os constituintes ativos da pozolana, hidróxido de cálcio e água; é um indicativo de sua capacidade de participar das reações que levam à formação de compostos resistentes no concreto. As habilidades de desenvolvimento de resistência são uma condição necessária para que qualquer material seja considerado para aplicações estruturais (CHRISTOPHER *et al.*, 2017).

Segundo a EMBRAPA (2021), o arroz é cultivado em todos os continentes, destacando-se, em primeiro lugar, o asiático, com uma produção equivalente a 89,9% da mundial, vindo, em seguida, o continente americano, com 5,0%; o africano, com 4,2%, o europeu, com 0,5 %, e o oceânico, com 0,1% da produção mundial de arroz.

A produção mundial anual de arroz, em 2018, foi de 742 milhões de toneladas, o que equivale à disponibilização de, aproximadamente, 148 milhões de toneladas de casca de arroz; a taxa de produção da cinza de casca de arroz é em torno de 20% da casca de arroz seca (EMBRAPA, 2021). Nas Américas, o arroz possui grande

importância social e econômica. O Brasil situa-se em nono lugar, com uma produção correspondente a 1,5% da mundial (EMBRAPA, 2021).

Observando-se a distribuição da produção de arroz no Brasil, pode-se verificar que o Sul é a maior região geradora, com 8,93 milhões de toneladas, em torno de 82% do total nacional, com produtividade de 7835 kg/hectare e ocupação de 67% da área de cultivo no país (COELHO, 2021). A Tabela 1 mostra a área, produtividade e produção total de arroz, por região do país.

Tabela 1 - ÁREA, PRODUTIVIDADE E PRODUÇÃO TOTAL DE ARROZ, POR REGIÕES DO BRASIL

Unidade geográfica	Área (mil ha)			Produtividade (kg/ha)			Produção (mil t)		
	2018/19	2019/20	2020/21	2018/19	2019/20	2020/21	2018/19	2019/20	2020/21
Centro-Oeste	154,8	152,5	170,6	3633	3895	3770	562,4	594,1	643,2
Norte	216,8	228,3	232,9	4335	4344	4318	940	991,9	1005,7
Sul	1173,9	1117,4	1139,7	7378	8261	7835	8660,7	9231,3	8929,8
Sudeste	13,2	10,5	10,5	3666	4018	4046	48,5	42,2	42,5
Nordeste	143,8	157,1	165,5	1891	2061	1948	272	323,9	322,5
Brasil	1702,5	1665,8	1719,2	6158	6713	6366	10483,6	11183,4	10943,7

Fonte: Coelho (2021)

Com a participação de 1,5% da produção mundial conforme o dado fornecido pela EMBRAPA (2021), estima-se que haja, então, algo próximo de 11.130.000 toneladas de arroz geradas em território nacional. Considerando que, disso, 20% são correspondentes à casca, seriam 2.226.000 de toneladas de casca de arroz e, consequentemente, 445.200 kg de cinza de casca de arroz em potencial. Ainda, tendo como base o dado de que, para uma tonelada de clínquer são emitidos cerca de 836 kg de CO_2, enquanto que o processo de obtenção da cinza de casca de arroz emite, a cada 1kg de material, 0,1032 kg de CO_2, caso os 445.200 kg de cinza de casca de arroz fossem usados com o propósito de substituição do cimento Portland, pode-se pensar que uma estimativa de 326.242,56 kg das emissões de CO_2 seriam evitadas.

A cinza de casca de arroz é uma adição residual amplamente estudada (SCRIVENER *et al*., 2018). Caso processada adequadamente, resulta em uma pozolana rica em sílica, com alta reatividade química graças à sua alta área superficial. O desempenho pode ser muito bom, apesar de sua área superficial muito alta, o que, em algumas aplicações, pode aumentar a demanda de água para uma boa fluidez requerendo o uso de superplastificantes já nas substituições de cimento

Portland nos teores equivalentes a 10 e 20% (SHAFIGH et *al*., 2014; CHRISTOPHER *et al*., 2017; SANDHU E SIDDIQUE, 2017; SCRIVENER *et al*., 2018).

No que se refere à durabilidade, alguns resíduos, quando adicionados às pastas, às argamassas e aos concretos, podem ser benéficos, enaltecendo propriedades do material, além de tornar fontes de matéria-prima para a construção civil (VASCONCELOS; AKASAKI, 2010).

A cinza de casca de arroz tem natureza pozolânica, devido ao alto teor de sílica, podendo ser efetivamente usada como material cimentício suplementar, em substituição parcial ao cimento, ajudando a alcançar um concreto mais ecológico e econômico. Além disso, o uso de subprodutos na produção de concreto resulta em benefício ambiental, uma vez que reduz os problemas associados ao seu descarte (CORDEIRO *et al.,* 2008; SANDHU; SIDDIQUE, 2017).

De acordo com CHANDRASEKHAR *et al.,* (2008), parcialmente queimada, entretanto, a casca de arroz contribui para mais poluição ambiental. Tem havido esforços não apenas para superar isso, mas também encontrar agregação de valor a esses resíduos, usando-os como fonte secundária de materiais. A casca de arroz contém cerca de 20% de sílica, que está presente na forma amorfa hidratada. No tratamento térmico, a sílica se converte em cristobalita, que é um polimorfo da sílica. No entanto, sob condições controladas de queima, é produzida sílica amorfa com alta reatividade, tamanho ultrafino e grande área superficial. Devido à alta atividade pozolânica, essa sílica da casca de arroz também encontra aplicação em concretos de alta resistência, como no papel de substituta da sílica ativa (CHANDRASEKHAR *et al.,* 2008).

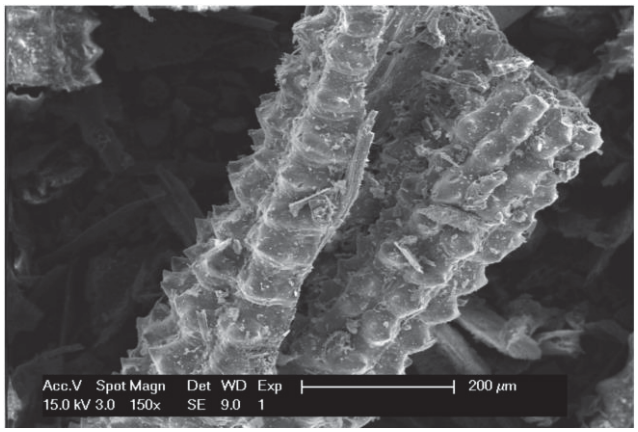
Jauberthie *et al*. (2000) identificaram que uma adição de cinza casca de arroz poderia ser utilizada na produção de concreto leve. Ainda, os autores puderam concluir que a concentração de sílica é alta na face externa da casca, muito mais fraca na face interna e praticamente inexistente dentro da casca. Esses resultados confirmam que a presença de sílica amorfa está concentrada nas superfícies da casca de arroz e não dentro da própria casca; esta sílica amorfa e, em menor grau, o quartzo de grão fino, explicam o papel pozolânico observado anteriormente.

Sandhu e Siddique (2017) concluíram que a absorção de água e a porosidade diminuem com o aumento de conteúdo de cinza de casca de arroz até 30% de substituição ao cimento Portland devido às pequenas partículas melhorarem a densidade de empacotamento, levando a um volume reduzido de poros. Os autores

ainda defenderam que a formação do gel C-S-H aumenta com o teor de sílica de casca de arroz no concreto autocompactante, que é o principal motivo para aumentar a resistência em comparação com outras misturas.

A Figura 8 é uma imagem de fragmentos dos esqueletos altamente porosos ricos em cinza de casca de arroz após queima descontrolada em um forno de campo.

Figura 8 - IMAGEM DE FRAGMENTOS DE ESQUELETOS- CINZA DE CASCA DE ARROZ



Fonte: Shafigh *et al*., (2014)

Min-Hong e Mohan (1996) estudaram as propriedades físicas e químicas da cinza de casca de arroz, bem como do concreto fresco (trabalhabilidade, tempo de pega) e endurecido (resistência à compressão, tração, módulo de elasticidade, retração por secagem, resistência à penetração de íons cloreto, resistência ao ciclo de congelamento e descongelamento) incorporando a mesma cinza. Embora exija uma dosagem maior do superplastificante e do aditivo incorporador de ar em comparação com os do concreto controle e do concreto de sílica ativa, o concreto com a cinza de casca de arroz pode ser produzido com abatimento do tronco de cone, teor de ar e tempo de pega satisfatórios, indicando viabilidade de uso da cinza.

Bixapathi e Saravanan (2022) estudaram a resistência e durabilidade (foram testados ataques ácidos e alcalinos) do concreto utilizando cinza de casca de arroz em substituição parcial ao cimento Portland (com níveis de 0% a 25%, com variações a cada 5%), com uso de ensaios de resistência à compressão, tração e flexão. Os autores concluíram que a cinza de casca de arroz possui características que a tornam viável. Quanto à sílica de casca de arroz (SCA), a resistência à compressão do concreto que contém esse material depende da relação água/ cimento, mas pelo menos até 10% de substituição do cimento por SCA resultará em desenvolvimento de resistência comparável às amostras de controle (CHRISTOPHER *et al.*, 2017). Além

disso, concretos com cinza de casca de arroz podem ter maior resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade em várias idades em comparação a uma série de referência (RAMEZANIANPOUR *et al.*, 2009; CHRISTOPHER *et al.*, 2017).

Nesse contexto, a microestrutura poderá ter característica menos permeável a agentes de degradação como ataques por sulfato e ingresso de cloretos, além de boas propriedades de retração, produzindo concreto durável quando usado (RAMEZANIANPOUR *et al.*, 2009; CHRISTOPHER *et al.*, 2017).

A SCA pode ser usada na fabricação de concreto autoadensável (CAA); com incorporação de 10 a 15% como substituição parcial do cimento, que aumenta as propriedades de resistência e durabilidade do CAA. A pesquisa sobre o papel da SCA no CAA, não só viabiliza sua utilização, mas reduz custos de aterro e também fornece uma solução ambiental mais limpa e sustentável na economia de energia, reduzindo a geração de dióxido de carbono pelo consumo de cimento (SANDHU; SIDDIQUE, 2017).

Sandhu e Siddique (2017) avaliaram que o alto teor de sílica contido na sílica de casca de arroz, faz com que este seja um material de construção pozolânico adequado para o desenvolvimento de resistência a longo prazo em concreto auto compactante. Também, que a resistência à compressão, por exemplo, aumenta com o acréscimo de conteúdo em até 15% devido ao micropreenchimento e efeitos pozolânicos, com a melhora na microestrutura e estrutura dos poros de concreto.

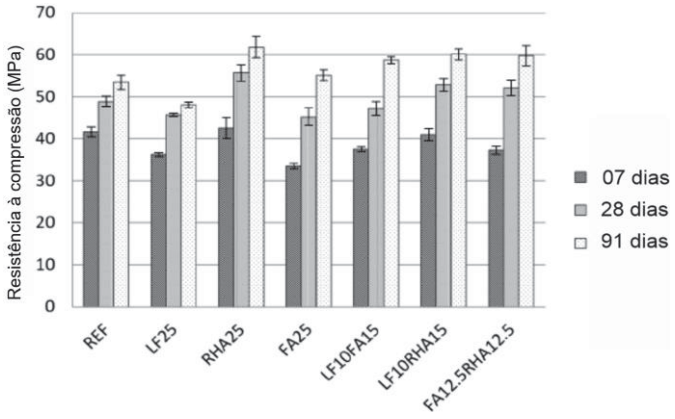
Os resultados de Araújo *et al*. (2022) mostraram que os SCMs (materiais cimentícios suplementares) aumentam a resistividade elétrica superficial (RES) do concreto e têm efeito direto no risco de corrosão. Além disso, o tamanho das amostras, a geometria e o espaçamento das sondas do equipamento utilizado nas medições (Resipod) influenciam na RES; novos fatores de ajuste com base nos dados experimentais foram propostos e validados usando uma ampla gama de projetos de mistura de concreto contendo materiais cimentícios suplementares.

A investigação de Feltrin *et al.* (2020) teve o propósito de avaliar os efeitos físicos, químicos e sinérgicos da substituição de 25% de cimento em massa por fíler calcário, cinza volante e cinza de casca de arroz, em similaridade de condição física (curvas granulométricas próximas), e comparar as diferentes misturas binárias e ternárias de concreto após 28 e 91 dias de cura úmida, mantendo-se constante a relação água/aglomerante. As amostras de concreto foram caracterizadas em relação

à resistência à compressão axial e quanto à sua microestrutura com uso de técnicas de TG/DTA e MEV/EDS.

Na Figura 9 (FELTRIN *et al*., 2020), são apresentados os resultados de resistência à compressão axial das diferentes misturas nas idades iniciais, aos 7, 28 e 91 dias, de traços que utilizaram substituição de 25% ao cimento Portland por massa calcária (LF), cinza volante (FA), cinza de casca de arroz (RHA) em diferentes proporções nos traços, o que está indicado pelas designações no gráfico (percentual de cada material logo após a sigla utilizada). Os desvios padrão resultantes de cada amostra foram indicados no gráfico. A resistência aumentou com o tempo de cura, como esperado, e aos 7 dias apenas a mistura RHA25 apresentou resistência superior ao concreto de referência. Aos 28 dias, a maioria das misturas com substituição de cimento por adições minerais apresentaram resistência próxima ou superior à de referência. Aos 91 dias, apenas a resistência da mistura LF25 não foi superior à do concreto de referência.

Figura 9 - RESISTÊNCIA MECÂNICA – RESULTADOS PARA 07, 28 E 91 DIAS



Fonte: Feltrin *et al*. (2020) - traduzido pela autora

Vários obstáculos impedem o uso mais amplo de SCA e outras cinzas vegetais em cimento e concreto; a variabilidade sazonal e geográfica, a dificuldade de produzir cinzas reativas e, ao mesmo tempo, explorar os resíduos agrícolas como combustível (SCRIVENER *et al*., 2018).

2.2. DURABILIDADE

Por um longo período, o concreto foi considerado como um material de longa duração que requer pouca ou nenhuma manutenção (o foco estava sobre a resistência

à compressão) e, apesar desse tratamento como de “longa duração”, muitos edifícios em todo o mundo se deterioraram nos últimos 65 a 75 anos (SUGANDHINI *et al*., 2022). Os constituintes utilizados na produção do concreto, a técnica envolvida, lançamento, compactação e cura, condições de exposição, métodos de carregamento e diferentes poluentes, como dióxido de carbono, são os fatores que contribuem para a deterioração do concreto (SUGANDHINI *et al*., 2022).

Sabe-se hoje, contudo, que durante a vida útil de uma estrutura de concreto, pode ser percebida essa degradação e, consequentemente, a diminuição da durabilidade pela ocorrência de manifestações patológicas (MEDEIROS *et al.*, 2017). Todo agente agressivo presente no ambiente ao redor de uma estrutura de concreto pode percolar, difundir e penetrar nos poros do concreto de acordo com as leis do mecanismo de transporte (LEVY; HELENE, 2004).

Uma grande contribuição ao desenvolvimento de manifestações patológicas é a presença de água, já que é considerada o solvente universal e pode funcionar como veículo de transporte de agentes agressivos, associada, muitas vezes, ao processo deletério do concreto durante sua vida útil, degradando física e mecanicamente as estruturas (LEVY; HELENE, 2004; VASCONCELOS; AKASAKI, 2010).

Sugandhini *et al*. (2022) apresentam que, em algumas regiões da Índia, por exemplo, o solo e a água do subsolo contêm substâncias químicas nocivas e sais que afetam a durabilidade do concreto; os principais fatores relacionados incluem permeabilidade, microfissuras, corrosão e carbonatação. Os autores ainda mencionam que, haja vista a existência da preocupação com as construções sustentáveis, o desafio torna-se a produção de concretos de resistência e durabilidade suficientes contra interações dependentes do tempo de carregamentos, envelhecimento, fissuração, condições de exposição e mudanças atmosféricas.

A durabilidade das estruturas está intimamente ligada aos processos de degradação. A corrosão das armaduras é a principal causa de degradação em estruturas de concreto armado, afetando-se a capacidade portante da estrutura (BALESTRA, 2019). Sob condições ambientais adversas, agentes como sulfatos e cloretos penetram no concreto por meio de fissuras (até mesmo as de difícil identificação) e danificam a matriz do concreto e as barras de aço no concreto armado (PARASTEGARI *et al.,* 2019), disso vem a importância do estudo sobre durabilidade, com indicadores.

Quando um material é usado garantindo que a durabilidade do concreto será maior, a contribuição com a redução das emissões de CO_2 é indireta, porque estruturas duráveis requerem menos reparos e manutenção (MALHOTRA, 2005).

O projeto com vistas à durabilidade do concreto está sendo objeto de crescente demanda, devido às prescrições constantes em códigos e normas se mostrarem insuficientes para garantir a durabilidade satisfatória em ambientes agressivos e a necessidade de otimizar os recursos naturais para melhorar a sustentabilidade do concreto (ANDRADE; D'ANDREA, 2010).

As normas para durabilidade do concreto, em geral, contam com disposições relacionadas aos insumos do concreto: cimento, água, aço, agregados, proporções no traço, resistência à compressão, limite de substâncias perigosas como cloretos e sulfatos, limitações para abertura de fissuras, espessuras de cobrimento recomendadas em função das classes de exposição. No entanto, há uma demanda crescente de incorporação de conceitos de padrões atuais mais avançados relacionados à durabilidade, para melhor prevenir a ocorrência de mecanismos de deterioração, em particular a corrosão de armaduras (ANDRADE, 2005).

A durabilidade tornou-se uma preocupação dos projetistas (MEHTA; MONTEIRO, 2008), pois os profissionais precisam de ferramentas para modelar ou prever a deterioração das estruturas de concreto ao longo de sua vida útil (ALEXANDER, 2018).

Embora o treinamento e a experiência dos engenheiros de estruturas se concentrem principalmente nos aspectos físicos e mecânicos do projeto e da especificação, a nova demanda é mais abrangente, requerendo dados para soluções práticas de problemas de deterioração com base no tempo. As demandas modernas de longevidade, durabilidade e sustentabilidade das estruturas de concreto não podem ser atendidas sem uma correta modelagem de vida útil (ALEXANDER, 2018).

Os problemas de durabilidade em estruturas de concreto cobrem uma vasta gama incluindo agentes agressivos externos (sulfatos, por exemplo), incompatibilidades de material interno (reação álcali-agregado, por exemplo) e ambientes agressivos, tais como aqueles sujeitos à ação de congelamento e descongelamento (ALEXANDER, 2018).

Perspectivas surgiram em diferentes partes do mundo em resposta às necessidades percebidas de melhor durabilidade das estruturas de concreto. Segundo Alexander (2018), que apresenta resumo das abordagens baseadas em desempenho

de durabilidade em vários países com base em índices de durabilidade, o Canadá e Holanda utilizam como parâmetro a penetração de íons cloreto, enquanto que a Noruega usa a difusividade de cloreto, a Espanha, resistividade elétrica, a Suíça, migração de cloretos, carbonatação acelerada, permeabilidade ao ar no local, a África do Sul a permeabilidade de oxigênio, absorção de água, condutividade do cloreto.

Há elementos chamados de indicadores de durabilidade que pretendem descrever e controlar problemas de deterioração com parâmetros físicos, químicos e eletroquímicos (ALEXANDER, 2018). Alguns dos indicadores que podem balizar a durabilidade são: resistividade elétrica, migração de cloretos, permeabilidade ao ar e absorção de água.

Medeiros-Junior *et al*. (2019) estudaram a durabilidade com base na absorção de água por imersão e capilaridade, resistividade elétrica e resistência à compressão com dois tipos de cimento. Nos concretos com maior teor de pozolanas (27%) foram aferidas as maiores medidas de resistividade elétrica e absorção de água por capilaridade para relação água/cimento menor que 0,60, devido à redução do diâmetro dos poros.

Muitas vezes, a resistência mecânica é usada como parâmetro de durabilidade. Contudo, nem sempre a avaliação da durabilidade com base nos resultados de resistência mecânica é adequada. Nesse contexto, surge a necessidade de avaliar e quantificar parâmetros relacionados diretamente com a durabilidade do concreto armado (REAL; MEDEIROS, 2015). Importante, então, a consideração dos indicadores de durabilidade.

2.2.1. Resistividade elétrica

A resistividade elétrica (RES) é uma característica dos materiais em geral, sendo o inverso da condutividade elétrica, indicando habilidade de transporte de cargas elétricas no material avaliado (REAL; MEDEIROS, 2015). Pode ser usada como parâmetro balizador ao estudo de materiais que melhor se comportem à corrosão, o que contribuiria com a execução de estruturas mais duráveis, funcionando como parâmetro de vida útil e qualidade (ANDRADE, 2005; GODINHO *et al*., 2018; BALESTRA *et al*., 2020; ARAÚJO *et al*., 2022).

Além disso, a resistividade elétrica pode ser utilizada para controle de qualidade de pré-fabricados e para modelagem da vida útil de estruturas de concreto

armado sujeitas à corrosão por penetração de íons cloreto (REAL; MEDEIROS, 2015). É uma propriedade utilizada para monitorar a durabilidade das estruturas de concreto (ARAÚJO *et al*., 2022).

Pode ser caracterizada como a dificuldade de transporte das cargas elétricas pelo material que está em análise e pode ser obtida pela Segunda Lei de Ohm (ANDRADE; D'ANDREA, 2010). Aferida por meio de um ensaio não destrutivo, simples, rápido e barato, configura-se um dos métodos mais adequados para caracterização da microestrutura do concreto e consequente avaliação das propriedades mecânicas e relacionadas à durabilidade dos materiais cimentícios ao longo do tempo (BALESTRA *et al.*, 2020; GRAZIA, 2021; WOSNIACK *et al.,* 2021).

Há mais de uma forma de aferir a resistividade elétrica: pelo método direto (volumétrica), pelo ensaio de migração de cloretos, pelo método dos quatro pontos de Wenner; sendo esta última a mais conhecida e empregada para aferição de resistividade elétrica superficial do concreto (WOSNIACK *et al.,* 2021).

Os resultados do ensaio de resistividade elétrica podem ser comparados aos limites do Boletim 192 do CEB (1989), indicando o risco de corrosão de uma estrutura de concreto armado (REAL, 2015). Os valores de referência estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - PROBABILIDADE DE CORROSÃO CONFORME RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

Valores de resistividade elétrica (k.ohm.cm)	**Risco de corrosão**
< 5	Multo alta
< 10	Alta
< 20	Baixa
> 20	Negligenciável

Fonte: CEB (1989) apud REAL (2015)

Pode-se considerar que a resistividade elétrica está associada às características físicas e químicas do material e envolve a permeabilidade dos fluidos no concreto (SOLDADO, 2021). Está intrinsicamente relacionada às características do concreto (BALESTRA *et al.*, 2020), além da porosidade do concreto e grau de saturação da amostra (ANDRADE; D'ANDREA, 2010).

A resistividade elétrica é dependente das propriedades de microestrutura do concreto como tamanho dos poros, estado das interconexões, e por isso caracteriza

a durabilidade. A corrosão é um processo eletroquímico em que a taxa de fluxo de íons entre o ânodo e cátodo (taxa de corrosão) é afetada pela resistividade elétrica (SHAHMANSOURI *et al.,* 2019; HISSEINE, HAMOU, 2020; AKHTAR *et al.,* 2022).

Segundo Godinho *et al.* (2018), a forma e as dimensões do corpo de prova influenciam as leituras de resistividade elétrica; é necessário o cálculo de um fator de forma quando os corpos de prova têm uma relação b/d (base do corpo de prova/ distância equidistante entre eixos do resistivímetro) menor que 6.

No estudo de Araújo *et al*. (2022), todas as amostras apresentaram valores de resistividade elétrica crescentes após 91 dias, indicando influência tardia dos SCM. A cinza de casca de arroz apresentou maiores valores de resistividade elétrica devido à alta reatividade. A geometria e o tamanho das amostras influenciaram os valores da RES devido à diferença no volume do corpo de prova que rege o fluxo de corrente através do sólido. Cilindros de ø100 x 200 mm apresentaram maiores valores de RES, seguidos por cilindros de ø150 x 300 mm, vindo por último os espécimes cúbicos, com 250 mm de medida lateral. O espaçamento da sonda afeta as leituras, especialmente em sólidos com menor volume.

A correlação entre a resistividade elétrica do concreto e a corrosão de armaduras é inversamente proporcional, enquanto que a relação entre a condutividade do concreto e a corrosão é diretamente proporcional (GEIKER, 2013; BALESTRA *et al*., 2020).

Geiker *et al*. (2013) apresentaram uma revisão de literatura sobre a relação entre risco de corrosão de armadura e a resistividade elétrica do concreto; os autores comparam o efeito de vários parâmetros nas leituras de resistividade elétrica, como geometria, métodos de medição, análise de dados, dispersão (propriedades, escalas, correlações), condições de exposição e mecanismos de corrosão.

Na aferição da resistividade elétrica, percebem-se variações quando consideradas as adições pozolânicas no concreto (WOSNIACK *et al.,* 2021; SOLDADO *et al.,* 2021). Em concretos com adições minerais pozolânicas (situação recorrente quando estudada a ecoeficiência, pelo conceito de substituição parcial de cimento Portland), ocorre o aumento da resistividade elétrica com o passar da idade do concreto (SHAHMANSOURI *et al.,* 2019). Isso ocorre porque a reação pozolânica é um fator capaz de influenciar na resistividade elétrica pelo refinamento e melhor distribuição do tamanho dos poros na microestrutura da pasta, constitui uma pasta mais densa e dificulta a passagem de corrente elétrica.

Estudos de Wosniack *et al.* (2021) demonstraram que adições mais reativas desenvolveram resistividades elétricas superiores às da proporção da mistura de referência, enquanto a proporção com 10% de cinza volante no traço não é significativamente diferente da referência. Os autores concluíram que a utilização de diferentes adições pozolânicas impacta nos valores de resistividade elétrica medidos pela técnica dos quatro eletrodos e calculados pelo ensaio de migração de cloretos.

Medeiros-Junior e Lima (2016) analisaram a influência do tipo de cimento na resistividade elétrica do concreto. Os autores observaram que a resistividade aumenta com a hidratação do cimento ao longo do tempo, apresentando uma significativa mudança após 500 dias devido a um refinamento da rede de poros do concreto.

Mendes *et al*. (2018) propuseram um diagrama de dosagem para diferentes tipos de cimento, estabelecendo uma relação entre a resistência à compressão e a resistividade elétrica. Além disso, os autores observaram um aumento da resistividade elétrica quando o cimento Portland foi substituído em 10% por sílica ativa devido às reações pozolânicas que refinam a microestrutura porosa do concreto.

Em resumo, a resistividade elétrica fornece indicações sobre a conectividade dos poros, portanto está ligada à penetração de substâncias líquidas ou gasosas, tornando-se um parâmetro chave nas propriedades correspondentes à durabilidade (ANDRADE, 2005).

É sabido que a resistividade do concreto aumenta com o tempo devido ao refinamento da estrutura dos poros, essa evolução é muito similar ao aumento da resistência à compressão. A diminuição da porosidade com o avanço da hidratação reflete na resistência mecânica e na resistividade elétrica do concreto (ANDRADE, 2005).

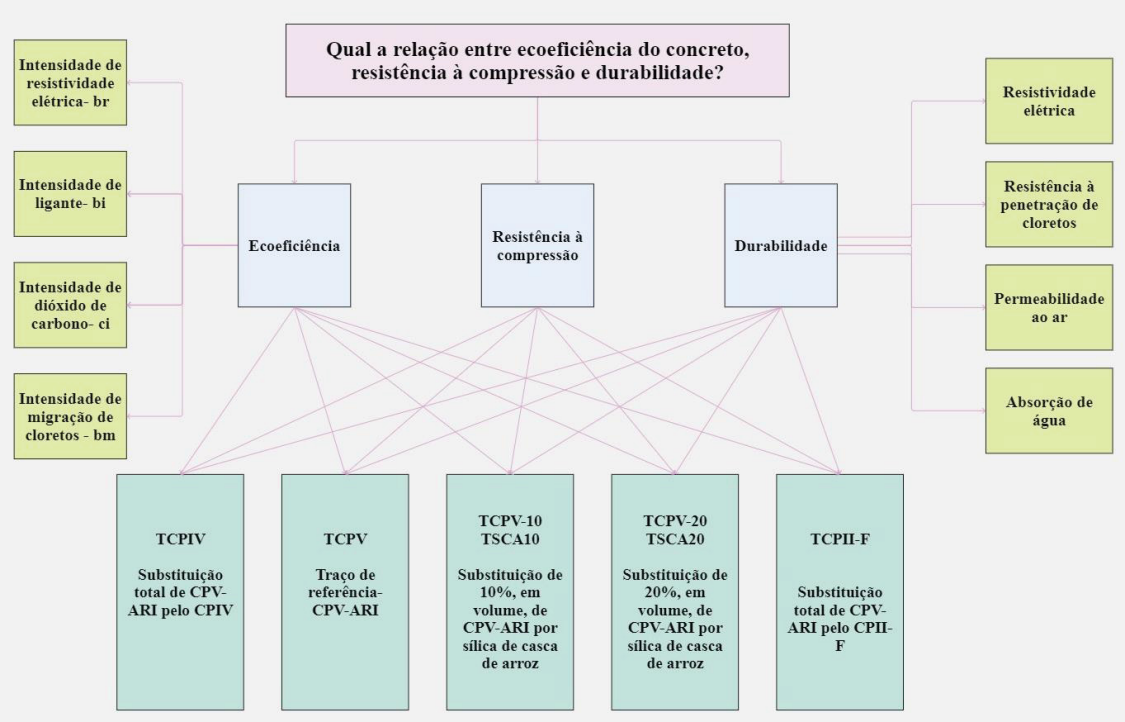
O uso da resistividade como parâmetro chave para modelar a durabilidade dos reforços pode ser feito: a) estabelecendo certos valores característicos a serem alcançados em condições padronizadas como requisito de performance ou indicador de durabilidade, b) calculando espessuras de cobrimento de acordo com a classe de agressividade por meio de certas equações como uma forma de modelo. Resulta a resistividade como promissora possibilidade, por ser um ensaio não destrutivo, que pode ser usado rotineiramente *in loco* para controle de qualidade (ANDRADE, 2005).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este programa foi planejado considerando-se a revisão bibliográfica e os objetivos desta pesquisa. O estudo foi baseado no método experimental, mediante moldagem de corpos de prova (com três tipos de cimento e percentuais de 10% e 20% de sílica de casca de arroz, em substituição parcial ao cimento Portland), caracterização, coleta de dados por ensaios de resistência mecânica e durabilidade aos 28, 56 e 91 dias, além de tratamento estatístico.

A Figura 10 demonstra como a proposta foi desenvolvida.

Figura 10 - SISTEMATIZAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL



Fonte: a Autora (2023)

Para descrever este trabalho, apresentam-se a seguir as proporções de mistura adotadas, as variáveis independentes (operadas) e as variáveis dependentes (medidas).

3.1. VARIÁVEIS DE ESTUDO

A unidade de análise deste trabalho é a ecoeficiência do concreto, em que diferentes tipos de aglomerantes foram submetidos a ensaios relacionados à resistência mecânica e durabilidade. Seguem as listas das variáveis deste estudo.

3.1.1. Variáveis independentes

- Adições pozolânicas: substituição parcial de 10% e 20% do cimento, mais a série de referência com CPV- ARI (3 níveis);
- Tipos de cimento: CPV- ARI, CPIV e CPII-F (3 níveis).

3.1.1.1. Proporções de mistura

Para se investigar o efeito da adição pozolânica, sílica de casca de arroz, sobre os indicadores de durabilidade e resistência mecânica, cinco diferentes misturas foram investigadas. As proporções de mistura foram adotadas a partir da série de referência do trabalho de Rivarola (2023). Utilizando o traço de referência citado, foi elaborada a Tabela 3.

Tabela 3 - PROPORÇÕES DAS MISTURAS- SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND EM VOLUME

Traço/ mistura	CPII-F	CPIV	CPV	SCA	Areia	Brita	a/a	Aditivo
CPV - TCPV	-	-	1,000	-	2,130	2,670	0,534	0,80%
CPIV- TCPIV	1,000	-	-	-	2,470	3,300	0,536	1,10%
CPII-F- TCPII-F	-	1,000	-	-	2,250	3,000	0,533	0,60%
CPV-20- TSCA20	-	-	0,830	0,170	2,810	3,750	0,534	0,80%
CPV-10- TSCA10	-	-	0,925	0,075	2,5	3,330	0,534	0,90%

Fonte: a Autora (2023)

Como se pode ver na Tabela 4, a relação água/aglomerantes foi mantida constante para todas as misturas. A proporção de aditivo variou para os diferentes concretos de modo a manter o abatimento de tronco de cone na faixa de 160 ± 30 mm.

Os traços para moldagem dos corpos de prova são:

- Traço CPV-ARI: traço de referência, que utiliza somente cimento CPV-ARI sem adições;

- Traço CPIV-32: traço que utiliza CPIV-32, substituindo totalmente o CPV-ARI;
- Traço CPV-ARI-10: traço que utiliza CPV-ARI com 10% de substituição, em volume, por sílica de casca de arroz;
- Traço CPII-F: traço que utiliza CPII-F substituindo totalmente o CPV-ARI;
- Traço CPV-ARI-20: traço que utiliza CPV-ARI com 20% de substituição, em volume, por sílica de casca de arroz.

3.1.2. Variáveis dependentes

As variáveis dependentes são as variáveis de resposta, analisadas em função da variação de nível das variáveis independentes.

São elas:

- Resistividade elétrica superficial (Ωm);
- Resistividade elétrica volumétrica (Ωm);
- Índice de vazios (%);
- Resistência à compressão (MPa);
- Absorção de água por capilaridade (g/cm²);
- Absorção de água por imersão (%);
- Resistência à penetração de cloretos (Coulombs);
- Permeabilidade ao ar (m²).

Os ensaios de resistividade elétrica, absorção de água e permeabilidade ao ar não são destrutivos, podendo-se realizar o monitoramento de resultados de acordo com as idades de cura do concreto para os mesmos corpos de prova. A resistividade elétrica foi medida aos 07, 14, 28, 21, 56 e 91 dias, enquanto que absorção de água e permeabilidade ao ar foram medidas aos 28 e 91 dias. Resistência à penetração de cloretos e resistência mecânica foram aferidas aos 28 e 91 dias de idade das amostras.

3.1.3. Procedimentos experimentais

Os ensaios foram realizados com base em normas nacionais, internacionais e em procedimentos descritos em trabalhos científicos. Após a coleta dos resultados, para as situações em que o coeficiente de variação for significativo (acima de 10%),

os valores que se distanciaram da média em uma vez o desvio padrão foram descartados. Em seguida, foi realizado o tratamento estatístico dos dados, através de uma análise de variância (ANOVA).

A Tabela 4 apresenta qual a especificação do procedimento que foi utilizado.

Tabela 4 - PROTOCOLOS EXPERIMENTAIS

Experimento	Referência
Resistência à compressão	ABNT NBR 5739:2018b
Permeabilidade ao ar	Método Torrent
Resistividade elétrica superficial (RES)	AENOR UNE 83988-2:2014
Resistividade elétrica volumétrica (REV)	ASTM C1876:2019
Resistência à penetração de cloretos	ASTM C1202:2019
Absorção de água por imersão e índice de vazios	ABNT NBR 9778:2005
Absorção de água por capilaridade	ABNT NBR 9779:2012

Fonte: a Autora (2023)

A Tabela 5 indica os ensaios desenvolvidos no experimento, assim como o número, a forma e dimensões dos corpos de prova utilizados para cada proporção de mistura.

Tabela 5 - TIPO DE ENSAIO, QUANTIDADE DE AMOSTRAS, FORMA E DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA

Ensaios	Quantidade de amostras	Corpo de prova	Dimensões
Resistência à compressão	04/ traço/idade	Cilíndrico	Ø 100 x 200 mm
Resistividade elétrica	04/ traço	Cilíndrico	Ø 100 x 200 mm
Absorção de água	04 /traço	Cilíndrico	Ø 100 x 200 mm
Migração de cloretos	02/ traço/idade	Cilíndrico	Ø 100 x 200 mm
Permeabilidade ao ar	04/ traço	Cilíndrico	Ø 150 x 300 mm
TOTAL = 24 corpos de prova por traço			

Fonte: a Autora (2023)

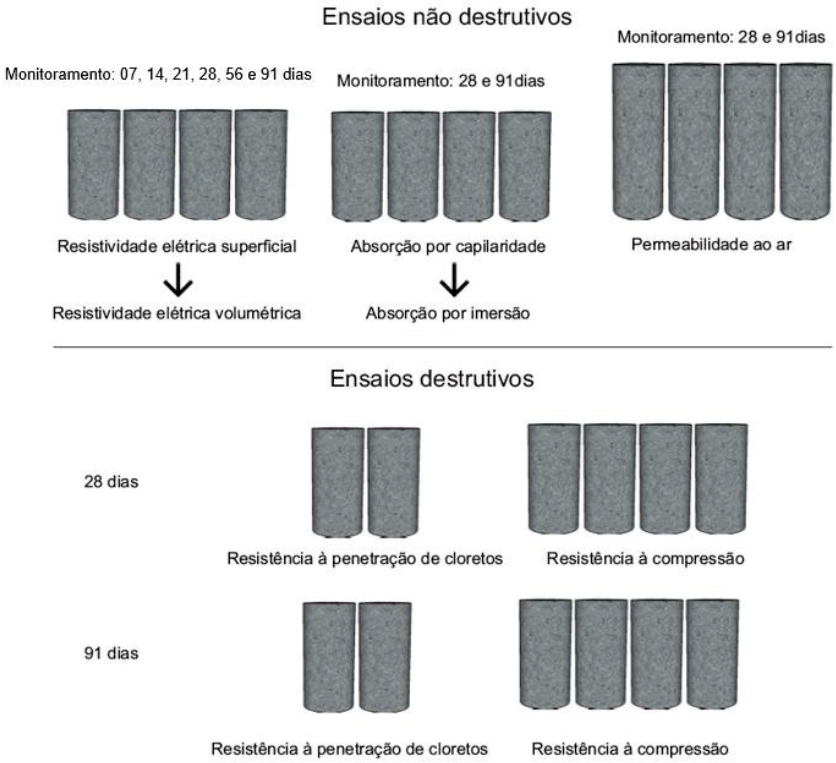
Os experimentos foram realizados conforme o esquema experimental apresentado na Figura 11.

Figura 11 - ESQUEMA DO EXPERIMENTO INDICANDO OS TEMPOS DOS ENSAIOS EM RELAÇÃO AO MOMENTO DA MOLDAGEM

Fonte: a Autora (2023)

A Figura 12 resume a quantidade de amostras por experimento e as idades de realização dos ensaios, compatibilizando esses dados.

Figura 12 - ORGANIZAÇÃO DE AMOSTRAS POR PROPORÇÃO DE MISTURA E IDADE DE CURA DO CONCRETO PARA EXPERIMENTAÇÃO



Fonte: a Autora (2023)

Em todas as análises, são mantidos constantes: o abatimento de tronco de cone, condições de cura (submersa/ saturada) e acondicionamento das amostras

(umidade relativa acima de 90% e temperatura de 23 ± 2 ºC até o momento dos ensaios). Para se entender os efeitos da adição pozolânica sobre os indicadores de durabilidade e resistência mecânica, é necessário que os resultados sejam avaliados por tipo de concreto, especificando-se um método de cada vez e em idades de cura equivalentes.

3.2. MATERIAIS

Neste capítulo estão descritos os materiais utilizados no programa experimental: cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo, sílica de casca de arroz e aditivo superplastificante.

3.2.1. Cimentos

Foram elencados para o desenvolvimento desta pesquisa, CPIV-32, CPII-F e CPV-ARI. O CPV-ARI foi escolhido para a proporção de mistura de referência devido à maior porcentagem de clínquer dentre os disponíveis no mercado, ou seja, o mais puro possível.

A Tabela 6 indica as exigências físicas dos cimentos em questão.

Tabela 6 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS CIMENTOS

Cimentos	Massa específica (g/cm²)	Tempo de pega		Blaine (m²/g)	Resistência à compressão (MPa)			
		Início (min)	Fim (min)		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
CP IV-32	2,83	229	280	4152	14,80	26,80	32,60	44,90
CP II-F-32	3,06	219	267	3342	15,50	29,30	34,60	41,50
CPV-ARI	3,00	176	223	4264	27,10	39,00	45,10	53,00

Fonte: Itambé (2023)

A Tabela 7 indica as exigências químicas do cimento CPV-ARI, cimento CPII-F-32 e cimento CPIV.

Tabela 7 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS CIMENTOS

Amostras	Al_2O_3 (5)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Perda ao fogo (%)	CaO livre (%)	Resíduo insolúvel (%)	Equivalente alcalino (%)
CP IV-32	9,41	28,44	3,66	45,30	2,83	2,25	5,47	1,45	24,79	1,15
CP II-F-32	4,29	18,41	2,81	59,87	2,49	2,62	6,84	1,70	1,37	0,66
CPV-ARI	4,47	18,62	2,88	61,59	3,18	2,83	3,70	1,76	0,83	0,69

Fonte: Itambé (2023)

3.2.2. Sílica de casca de arroz

Neste trabalho foi utilizado o material pozolânico chamado sílica de casca de arroz, comercializado pela empresa Energia Elétrica Alegrete (GEEA), localizada no município de Alegrete/RS.

A Tabela 8 mostra a análise química deste material realizada por meio da fluorescência de raios X, além do resultado do ensaio de massa específica e de área específica B.E.T.

Tabela 8 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DA SÍLICA DE CASCA DE ARROZ

Composição Química (%)								
SiO_2	Al_2O_3	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3	MgO	**Demais Óxidos**	**Perda Fogo**
88,47	2,72	1,55	1,46	0,43	0,05	-	0,49	4,84
Características Físicas								
Massa esp. (g/cm³)				**BET (m²/g)**				
2,12				4,692				

Fonte: ADORNO (2017)

A Tabela 8 indica que a sílica de casca de arroz apresenta elevado teor de sílica (SiO_2), o que não garante, por si só, um elevado potencial reativo, mas indica a pureza do material analisado.

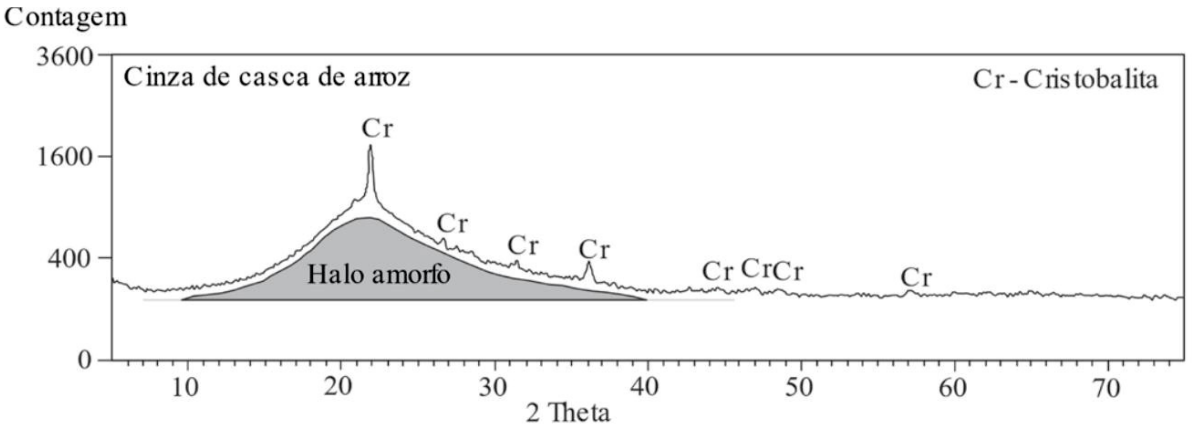
De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015), para ser classificada como pozolana a adição deve ter o somatório de SiO_2, Fe_2O_3 e Al_2O_3 maior que 70%. A sílica da casca de arroz usada apresenta um somatório de 91,24%, ficando bastante acima do limite mínimo estipulado.

A reatividade da adição mineral foi determinada de maneira direta, por Rivarola (2023) utilizando o ensaio Chapelle modificado, conforme a norma NBR 15895 (ABNT, 2010). Esse procedimento fundamenta-se na capacidade da adição mineral em fixar a cal devido às reações pozolânicas. Desse modo, a atividade pozolânica da sílica de casca de arroz resultou em uma fixação de 1336 mg de $Ca(OH)_2$ para 1 grama de sílica de casca de arroz, valor consideravelmente acima do mínimo para que o material seja considerado pozolânico (436 mg/g). De acordo com Souza (2016), por apresentar atividade pozolânica superior a 1100 mg $Ca(OH)_2$/g, o material pode ser classificado como pozolana de alta reatividade.

A Figura 13 mostra uma análise por difratometria de raios-X (DRX), que indica o potencial reativo da sílica de casca de arroz. Observa-se que a sílica de casca de

arroz apresentou alguns picos de cristobalita, uma das formas cristalinas da sílica. O halo amorfo indicado na Figura 13 representa a porção vítrea da adição, indicando a presença de material pozolânico.

Figura 13 - DIFRATOGRAMA DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ



Fonte: ADORNO *et al*. (2017)

3.2.3. Agregados

O agregado graúdo e agregado miúdo utilizados são de origem natural, extraídos da região metropolitana de Curitiba, sendo eles: areia (granulometria média) e brita basáltica (dimensão máxima de agregado equivalente a 19 mm). Antes do uso, os agregados foram secos em estufa por período de 24h, a 105° C. A Tabela 16 descreve os parâmetros de caracterização dos agregados em questão.

Voigt (2022) usou os mesmos agregados desta pesquisa (areia natural e brita basáltica) e procedeu com a caracterização conforme a Figura 14.

Figura 14 - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

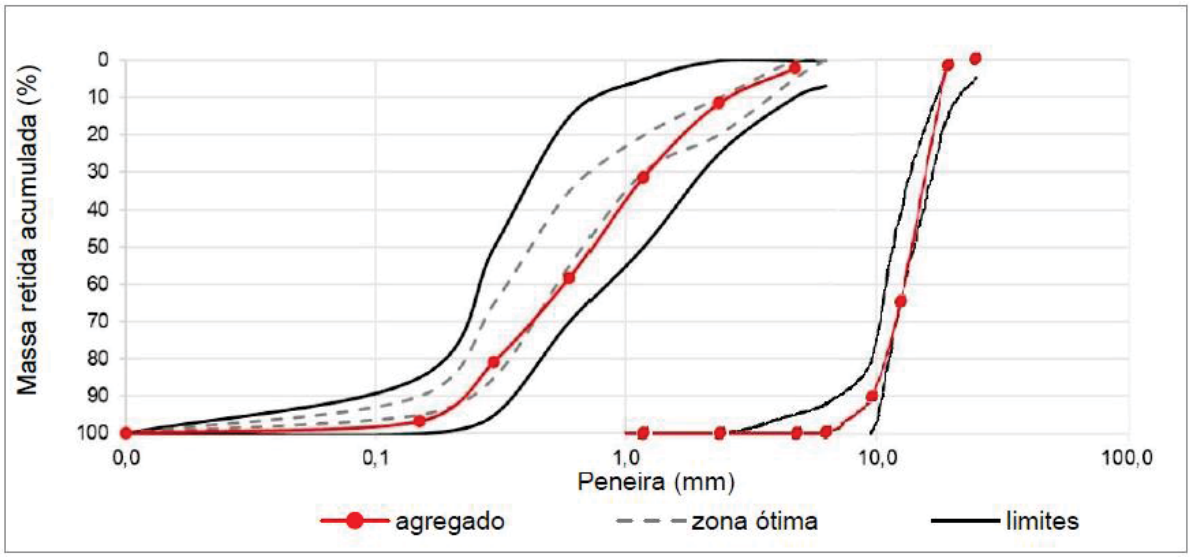
	Massa unitária (g/cm²)	Massa específica (g/cm²)	Massa específica SSS (g/cm²)	Absorção de água (%)	Teor de material pulverulento (%)	Módulo de finura	Dimensão máxima característica (mm)
Agregado miúdo	1,53	2,47	2,50	1,12	2,99	2,81	4,75
Agregado graúdo	1,57	2,72	2,75	0,60	0,14	-	19,00

Fonte: Voigt (2022)

A Figura 15 apresenta as curvas granulométricas do agregado miúdo e agregado graúdo, em relação aos limites propostos pela norma ABNT NBR NM

248:2003, esse gráfico foi elaborado inicialmente por Voigt (2022) e adaptado por Rivarola (2023) no grupo de pesquisa.

Figura 15 - CURVA GRANULOMÉTRICA- AGREGADO GRAÚDO | AGREGADO MIÚDO



Fonte: Rivarola (2023)

3.2.4. Aditivo

Como aditivo superplastificante foi utilizado o aditivo denominado ADVA FLOW 880, fornecido pela empresa GCP Applied Technologies, considerando-se o teor de sólidos. Este material é produzido para uso industrial com aplicação em concreto.

O ADVA é um aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, de aspecto líquido, redutor de água tipo 2, RA2, conforme a ABNT NBR 11768-2:2019. Segundo o fabricante, os aditivos da linha ADVA devem ser adicionados diretamente no concreto após a mistura dos materiais.

As dosagens normalmente variam de 0,3 a 1,2%, com base na quantidade de ligantes totais (cimento e adições).

3.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

3.3.1. Produção do concreto e moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados de acordo com NBR 5738 (ABNT, 2016), com dimensões 100 x 200 mm e 150 x 300 mm, sendo 24 corpos de prova para cada

proporção de mistura testada, e o abatimento do tronco de cone foi mensurado usando a NBR 16889 (ABNT, 2020). Todos os corpos de prova são cilíndricos e foram moldados com adensamento manual.

As fôrmas foram previamente preparadas com líquido desmoldante. Após a moldagem, as formas preenchidas foram cobertas com plástico filme, para evitar a perda de umidade. Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram na sala de dosagem, com a proteção de plástico filme, sendo desmoldados 24h após a produção do concreto.

As amostras passaram pela cura submersa em solução saturada de hidróxido de cálcio, desde a desmoldagem até a realização dos experimentos.

Os ensaios de resistência e durabilidade do concreto foram realizados aos 28 e 91 dias de idade. Para cada proporção de mistura, foram ensaiadas 04 amostras para resistência à compressão (por idade), 04 amostras para os ensaios de resistividade elétrica, 04 amostras para absorção, 02 para o ensaio de resistência à penetração de cloretos (por idade) e 04 amostras para permeabilidade ao ar.

3.3.2. Procedimentos de ensaios - resistência mecânica e durabilidade

3.3.2.1. Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados conforme prescreve a NBR 5739 (ABNT, 2018b). Desse modo, foram moldados corpos de prova de diâmetro 100 mm e altura igual a 200 mm.

Foram rompidas 4 amostras para cada idade ensaiada (28 e 91 dias) após cura submersa em solução saturada de $Ca(OH)_2$.

As bases das amostras saturadas foram preparadas com retificação dos extremos para o procedimento. O carregamento do ensaio foi aplicado, segundo a norma NBR 5739 (ABNT, 2018b), continuamente e sem choques, com a velocidade de carregamento de 0,45 ± 0,15 MPa/s. A velocidade foi mantida constante durante todo o ensaio, que foi executado em uma máquina universal de ensaios da marca Instron, com capacidade de carga de 250 KN, modelo AC6.08, assim como está ilustrada na Figura 16.

A resistência à compressão foi calculada pela Equação 03.

$$fc = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (03)$$

Em que:

fc é a resistência à compressão, expressa em megapascais (MPa);
F é a força máxima alcançada, expressa em newtons (N);
D é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

Figura 16 - PRENSA INSTRON, NÚMERO DE SÉRIE 23300P-0017 | 315. ORDEM 20888, CAPACIDADE 250KN, MODELO AC6.08

Fonte: a Autora (2023)

3.3.2.2. Absorção de água no concreto

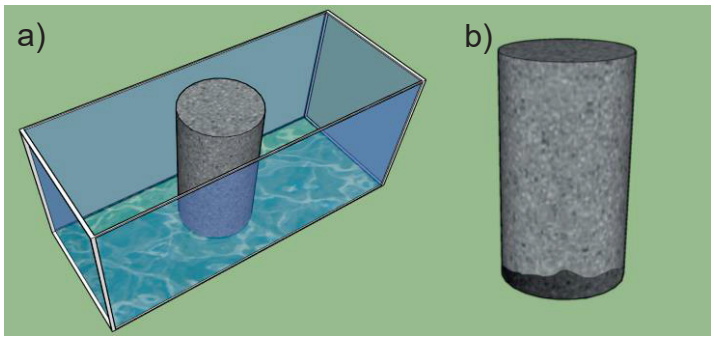
- <u>Absorção de água por capilaridade</u>

A absorção do concreto foi determinada a partir do ensaio de absorção de água por capilaridade prescrito pela NBR 9779 (ABNT, 2012).

Os corpos de prova são cilíndricos com dimensões Ø100 x 200 mm, que foram curados até a data de referência. Em seguida, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida para secagem em estufa por 144h, a 40 ± 5 ºC, sendo esta a única adaptação feita em relação ao procedimento da NBR 9779 (ABNT, 2012). O motivo desta adaptação é o fato que a secagem acima de 100 ºC já é suficiente para decompor alguns compostos de hidratação do cimento Portland, não sendo recomendado. O resfriamento das amostras foi executado em um dessecador e, em seguida, as massas secas foram determinadas.

Os corpos de prova, então, foram colocados em suportes dentro de um recipiente (em ambiente com temperatura constante de 23 ± 2 ºC com água nivelada a 5 ± 1 mm acima da face inferior da amostra, evitando a molhagem de outras superfícies, e as massas úmidas foram determinas à 3h, 6h, 12h, 24h, 48h e 72h (sendo as amostras previamente à pesagem enxugadas com pano úmido). A Figura 17 ilustra o procedimento do ensaio.

Figura 17 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MONTAGEM DO ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE (A) E CORPO DE PROVA APÓS O ENSAIO (B).



Fonte: a Autora (2023)

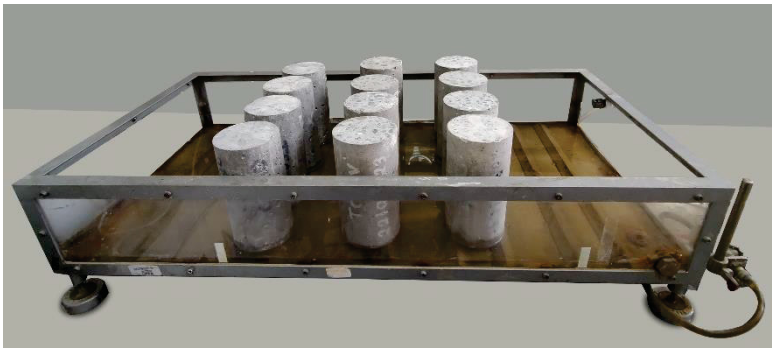
A Figura 18 apresenta registros fotográficos da realização do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Figura 18 - FOTOS DA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Fonte: a Autora (2023)

Na Figura 19, pode-se verificar a configuração do aparato durante a realização do ensaio.

Figura 19 - CONFIGURAÇÃO DO APARATO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE



Fonte: a Autora (2023)

Para cada tempo de medição, a absorção capilar foi calculada conforme a Equação 04.

$$C = \frac{m\,úmida - ms}{S}\ x\ 100 \qquad (04)$$

Em que:

C: absorção por capilaridade (%);

$m_{úmida}$: massa da amostra úmida durante o período especificado (g);

m_s: massa da amostra seca (g);

S: área da seção transversal da amostra (cm²).

Completada cada etapa, os corpos de prova retornaram imediatamente ao recipiente de ensaio até os demais momentos de medição.

- Absorção de água por imersão

A absorção de água por imersão (A) é o processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. Pela NBR 9778 (ABNT, 2005), é também o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco.

Os ensaios de absorção por imersão foram realizados conforme prescreve a NBR 9778 (ABNT 2005, versão corrigida 2009). Portanto, foram moldados corpos de prova de diâmetro 100 mm e altura igual a 200 mm, a fim de garantir o volume mínimo de 1500 cm³ indicado pela norma para cada amostra.

Para a secagem, as amostras foram colocadas em uma estufa, mantida a uma temperatura de 40 ± 5 ºC (sendo esta a única adaptação feita em relação ao procedimento, para preservação dos componentes de concreto) por 144h (a fim de garantir a secagem). Foi determinada e registrada a massa (ms). Em seguida, os corpos de prova foram imersos em água à temperatura de 23 ± 2 ºC e permaneceram nessa condição durante 72h. A massa imersa foi determinada e registrada com auxílio de balança hidrostática (mi). Ao ser retirada da água, as amostras foram enxugadas com pano úmido e foi registrada sua massa saturada (m_{sat}). O resultado final foi considerado como a média das determinações realizadas, que foi expresso com duas casas decimais. Os resultados de massa específica podem ser expressos em gramas por centímetro cúbico ou ser adimensionais, considerando a massa específica da água igual a 1 g/cm³.

A absorção de cada amostra foi calculada a partir da Equação (05).

$$A = \frac{msat - ms}{ms} \times 100 \quad (05)$$

Onde:

A: absorção por imersão (%);

m_{sat}: é a massa da amostra saturada (g);

m_s: é a massa da amostra seca (g).

A porosidade foi determinada com base nos índices de vazios das amostras, calculado a partir da Equação (06).

$$Iv = \frac{msat - ms}{m\,sat - mi} \times 100 \quad (06)$$

Onde ms: massa da amostra imersa em água (g), medida conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO – BALANÇA HIDROSTÁTICA

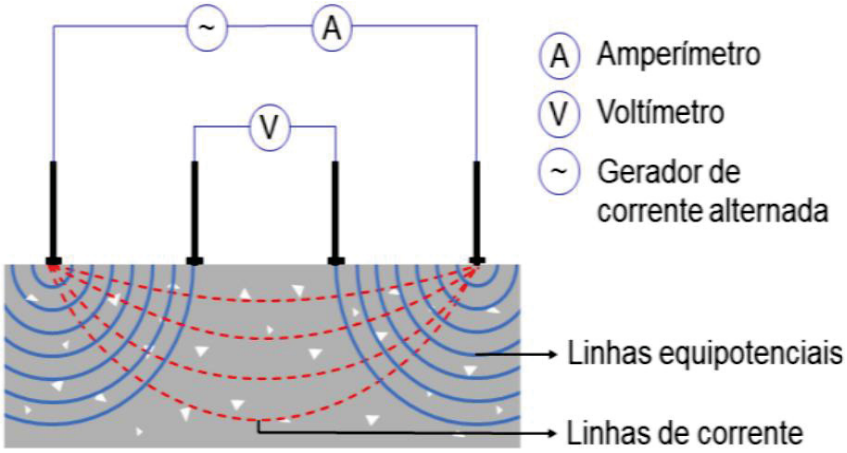
Fonte: a Autora (2023)

3.3.2.3. Resistividade elétrica

- Pelo método dos Quatro Pontos de Wenner

O ensaio dos quatro eletrodos de Wenner (representado na Figura 21) consiste em posicionar quatro eletrodos em contato direto com a superfície do concreto, preferencialmente saturada, visando eliminar a interferência da variação da umidade nas leituras realizadas. No ensaio, uma corrente é aplicada entre dois eletrodos externos e, consequentemente, uma voltagem é captada pelos eletrodos internos (IccET, 1989 apud REAL; MEDEIROS, 2015; WOSNIACK *et al.,* 2021).

Figura 21 - ESQUEMA DO MÉTODO DE QUATRO PONTOS DE WENNER



Fonte: WOSNIACK *et al.* (2021)

A diferença de potencial elétrico ou a corrente aplicada por meio de dois eletrodos externos a um corpo de prova é transportada através da rede de poros do concreto pelos portadores elétricos (íons). À medida que a porosidade aumenta, a resistividade é reduzida devido à maior fração volumétrica dos poros. Por outro lado, enquanto a resistividade está relacionada à porosidade e conectividade, em um concreto não saturado, também é um indicativo do grau de saturação (ANDRADE, 2005).

A resistividade elétrica da superfície do concreto pelo Método de Quatro Pontos de Wenner foi estudada por Araújo *et al.* (2022) quanto aos efeitos do tamanho da amostra, geometria, espaçamento entre os eletrodos (as sondas) e materiais cimentícios suplementares.

No Brasil, não existe uma norma regulamentadora para o ensaio de resistividade elétrica superficial (REAL *et al.*, 2019). Os resultados podem ser interpretados utilizando-se os limites prescritos pelo boletim 192 do CEB (REAL *et al.*, 2019).

O Método dos Quatro Pontos de Wenner é descrito pela norma espanhola UNE 83988-2, Determinación de la Resistividad Eléctrica - Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner (2014). Neste documento é especificado que podem ser usados corpos de prova cilíndricos de 100 x 200mm, com correção do fator de forma nos ensaios, conforme Tabela 9.

Tabela 9 - FATORES DE FORMA PARA DIFERENTES FORMATOS DE AMOSTRAS E DISTÂNCIAS ENTRE ELETRODOS

Amostra	**a = 35mm**	**a = 50mm**
Cilíndrica 300 x 150 mm	0,714	0,606
Cilíndrica 200 x 100 mm	0,571	0,377
Cilíndrica 150 x 75 mm	0,384	-
Prismática 40 x 40 x160 mm	0,172	-

Fonte: UNE 83988-2 (2014)

Como as amostras foram desformadas com 24 horas de idade, e permaneceram submersas até o momento das leituras, todas as medições de resistividade elétrica foram realizadas com o concreto saturado, superfície seca, conforme prescreve a norma AENOR UNE 83988-2:2014.

Para as medições foi utilizado um resistímetro modelo Resipod, da marca Proceq, que atende ao Método de Wenner, ilustrado pela Figura 22, em que um corpo de prova, apoiado sobre uma superfície não condutiva, é testado. Foram aferidas 06 leituras por corpo de prova para 04 corpos de prova de cada concreto, de dimensões 100 x 200 mm, multiplicando-se os valores pela constante de correção, 0,377 conforme a Tabela 9.

Figura 22 - AFERIÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA COM EQUIPAMENTO RESIPOD

Fonte: a Autora (2023)

A medição pode ser visualizada no visor poucos segundos após posicionamento do dispositivo sobre o corpo de prova.

- Pelo método volumétrico (direto)

O teste refere-se à medição da resistência elétrica e, em seguida, cálculo da resistividade elétrica. Deve ser montado equipamento para a aferição, segundo diretrizes da norma ASTM C1876-19.

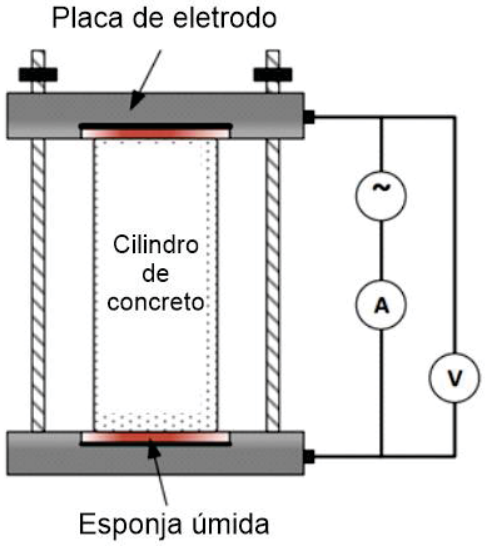
Um conjunto de eletrodos é colocado nas extremidades de um corpo de prova cilíndrico e uma diferença de potencial é aplicada ao cilindro, produzindo assim um fluxo de corrente através do cilindro. Desse modo, a diferença de potencial e corrente resultante pode ser usada para obter a resistência através do cilindro (SPRAGG *et al*., 2011).

A corrente elétrica é induzida por uma fonte de corrente alternada, capaz de aplicar uma diferença de potencial em toda seção do corpo de prova, então os

eletrodos devem possuir dimensão maior ou igual a área desta seção (SPRAGG *et al.*, 2011).

Mede-se a corrente elétrica e a tensão. Pela Segunda Lei de Ohm, determina-se a resistência do sistema. A sistematização da montagem do ensaio pode ser observada na Figura 23.

Figura 23 - DETERMINAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA DO CONCRETO



Fonte: Spragg *et al*. (2011) - traduzido pela autora

A resistência elétrica relaciona-se com a resistividade elétrica conforme a Equação 07.

$$\rho = R \times \frac{S}{L} \quad (07)$$

Em que:

ρ = resistividade elétrica (Ωm);
R= resistência elétrica aferida (Ω);
S= área da seção transversal (m²);
L= comprimento do corpo de prova (m).

Para montagem do experimento, um gerador de funções deve ser ligado ao aparato e ajustado para gerar ondas senoidais. As leituras de tensão e corrente são feitas com auxílio de multímetros, e devem ser tomadas em cinco diferentes frequências de corrente elétrica. Com os valores de tensão e corrente, e aplicando-se a Lei de Ohm, seguido do fator geométrico, obtém-se a resistência elétrica.

Foram utilizados na montagem do aparato: bandeja e suporte não condutivos, (de plástico), eletrodos de alumínio, feltro, elemento de carga (corpo de prova retificado), cabos e conectores.

O feltro foi cortado em pedaços circulares, de diâmetro igual a 100 mm, e umedecido. Além disso, o uso de gel condutivo para meios de contato melhora as condições de realização do ensaio.

No momento das aferições, os corpos de prova estavam na condição saturada, com a superfície seca. Foram realizadas duas medidas por corpo de prova, sendo que para a segunda medição, alterava-se a posição do corpo de prova (troca de posição).

Primeiramente, determina-se a resistência dos eletrodos, colocando-se um eletrodo sobre outro, com esponjas umedecidas, e aplicando-se uma carga sobre o eletrodo superior. Subtrai-se a resistência dos eletrodos da resistência aferida para os corpos de prova, que resulta na resistência real para o corpo de prova, que aplicada à Equação 7, chega à REV.

Os equipamentos eletrônicos envolvidos foram selecionados com base na característica de abrangerem a faixa de frequência do ensaio, como por exemplo o gerador de funções, marca Tektronix, modelo CFG280; multímetro, marca Icel, modelo MD-6111; multímetro marca Hikari, modelo HM-2090.

A conexão elétrica entre o corpo de prova e os eletrodos é melhorada pelo uso de esponjas umedecidas, que por sua vez, apresentam alguma resistividade. As leituras de tensão e corrente sempre consideram o conjunto, corpo de prova mais esponjas.

Pode-se afirmar que a configuração do aparato não permite medir, diretamente, a resistividade elétrica do corpo de prova. A medição direta sempre compreende o conjunto corpo de prova (CP) mais esponjas umedecidas. Por essa razão, a resistência das esponjas é determinada separadamente e este valor é descontado da resistência do conjunto CP mais esponjas. Depois disso, calcula-se a resistividade elétrica.

Para medir a resistência das esponjas, o aparato foi montado de forma que a corrente elétrica percorra somente as esponjas. A Figura 40 apresenta a montagem do ensaio no Laboratório de Materiais e Estruturas do Departamento de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná (LaME-DCC-UFPR).

A Figura 24 mostra algumas imagens da montagem do ensaio de medição da resistividade elétrica volumétrica.

Figura 24 - APARATO MEDIÇÃO REV

Fonte: a Autora (2023)

3.3.2.4. Resistência à penetração de cloretos

Os ensaios acelerados relacionados a testes de penetração de cloretos geralmente consistem na introdução de uma diferença de potencial elétrico externa que estimula a migração de cloretos no interior do concreto. Os procedimentos ASTM C1202 (2022) e NT B492 (1999) estão entre os mais utilizados neste contexto. A primeira recomenda a aplicação de uma diferença de potencial constante de 60 V, diferentemente da segunda norma que sugere um ajuste da diferença de potencial de acordo com a medição inicial da corrente elétrica que passa pelo sistema (HINO JUNIOR *et al*., 2021).

Os testes de migração de cloretos são usados para medir a capacidade do concreto inibir o ataque por cloretos (MEDEIROS *et al*., 2009). Um dos mecanismos que governam a penetração de cloretos em uma estrutura de concreto armado é a difusão, que é o transporte estimulado por uma diferença de concentração das espécies consideradas (MEDEIROS *et al*., 2009).

O procedimento de resistência à penetração de cloretos consiste no prescrito pela ASTM C 1202 (2022). Foi realizado com fatias centrais de diâmetro igual a 100 mm e espessura de 50 mm extraídas de corpos de prova cilíndricos 100 x 200 mm. A

partir do estudo de Medeiros *et al*. (2009), conclui-se que o uso de fatias centrais de um mesmo corpo de prova cilíndrico não compromete a acurácia dos resultados para o ensaio de migração de cloretos. Desse modo, neste trabalho foram cortadas 02 fatias da porção central de corpos de prova de Ø 10 x 20 cm.

A Figura 25 mostra a serra de corte durante a extração das fatias do corpos de prova.

Figura 25 - SERRA UTILIZADA NO CORTE DOS CORPOS DE PROVA

Fonte: a Autora (2023)

A Figura 26 apresenta as fatias após o corte e identificação.

Figura 26 - FATIAS DOS CORPOS DE PROVA APÓS CORTE E IDENTIIFICAÇÃO

Fonte: a Autora (2023)

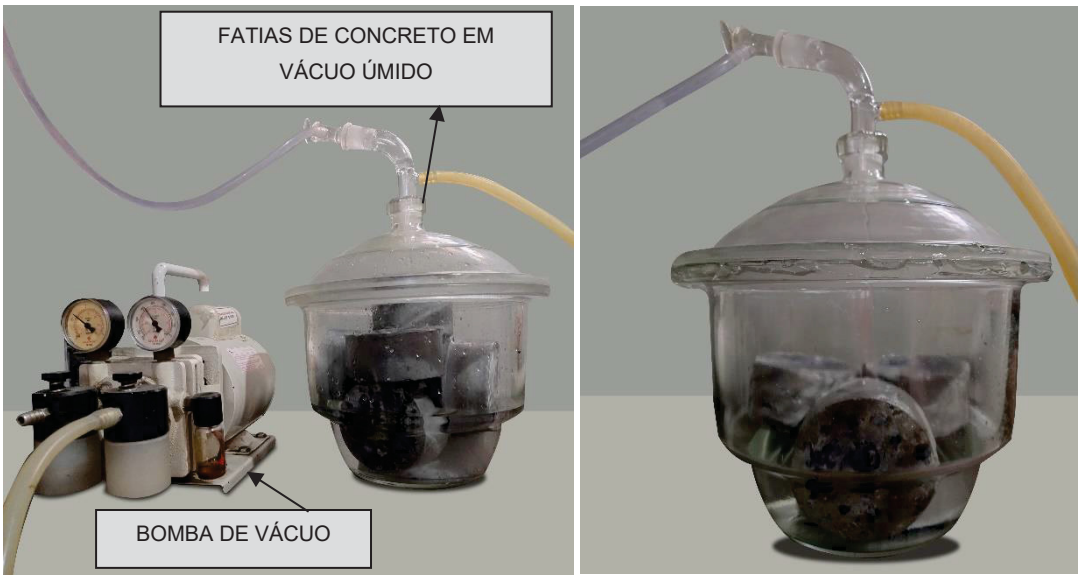
Os discos cilíndricos com 5 cm de espessura foram cortados com serra diamantada e foram impermeabilizados em toda a sua extensão lateral curva com silicone Tek Bond Saint-Gobain, a fim de garantir um fluxo unidirecional durante o ensaio.

Após a selagem das laterais das amostras com silicone, essas foram colocadas em um dessecador com aplicação de vácuo por 3 horas (conforme mostra as Figura 27 e Figura 28). Em seguida, as fatias foram saturadas, através de submersão em água destilada por 18 horas.

Figura 27 - FATIAS DO CORPO DE PROVA NO INTERIOR DO DESSECADOR DURANTE O A PREPARAÇÃO PARA O ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS

Fonte: a Autora (2023)

Figura 28 - ETAPA DE MANUTENÇÃO NO VÁCUO NO DESSECADOR- PROCESSO DE SATURAÇÃO DAS FATIAS DE CONCRETO PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS POR MIGRAÇÃO

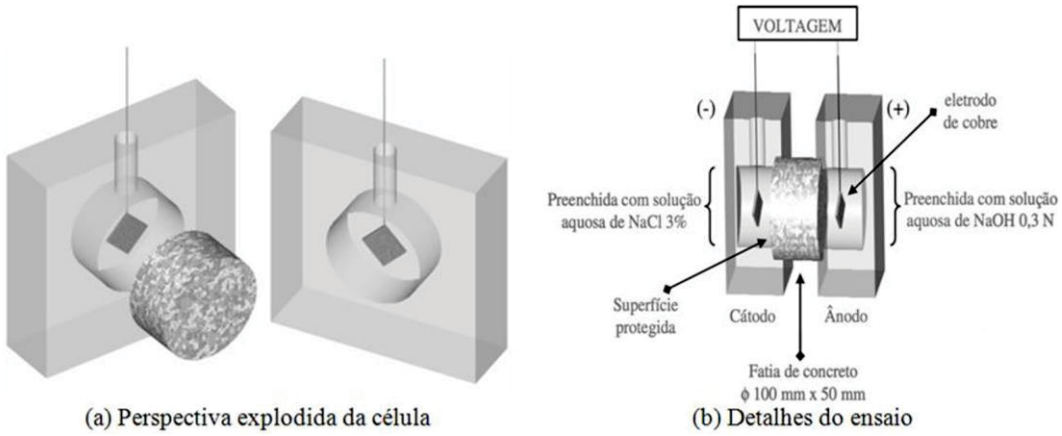


Fonte: a Autora (2023)

Na sequência, foram montadas as células do ensaio de migração. Cada fatia de concreto dos corpos de prova cortados foi fixada na célula com uso de silicone. Já montadas as células com a fixação do silicone, em um lado da célula de acrílico foi introduzida uma solução de 3% de NaCl, enquanto que do outro lado foi utilizada uma solução de 0,3N NaOH.

A Figura 29 demonstra o esquema de montagem das células de migração.

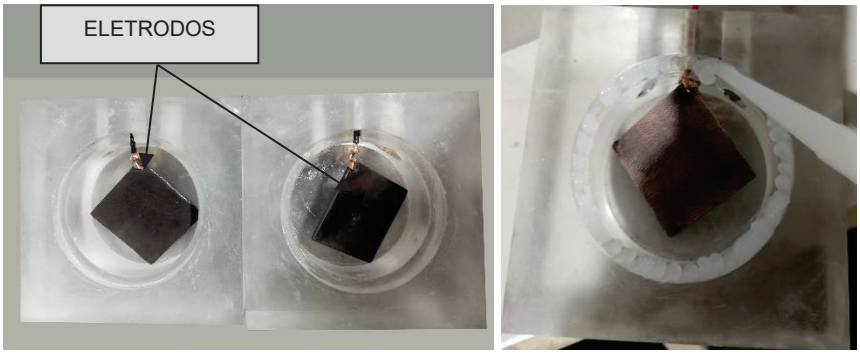
Figura 29 - ESQUEMA DA MONTAGEM DAS CÉLULAS PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS- ARRANJO EXPERIMENTAL DA CÉLULA DO TESTE DE MIGRAÇÃO DE CLORETO



Fonte: Medeiros *et al.* 2009

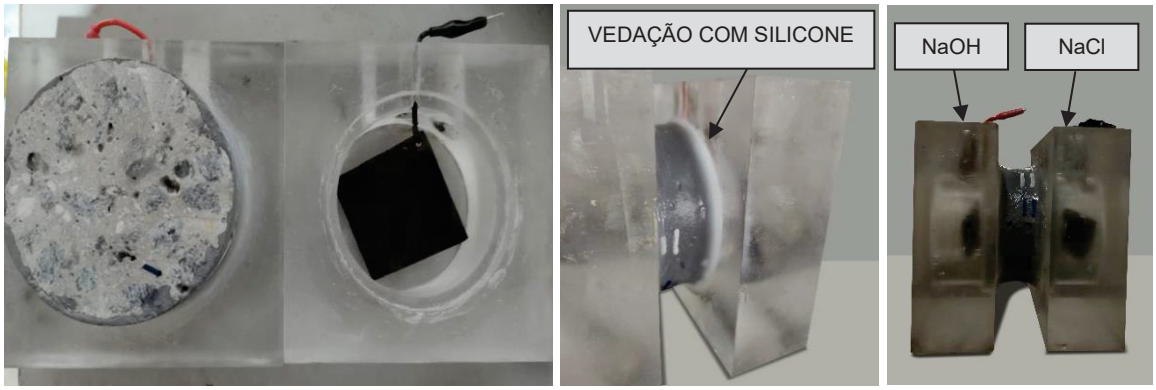
A Figura 30 e a Figura 31 apresentam o processo de montagem das células.

Figura 30 - MONTAGEM DAS CÉLULAS PARA OS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS



Fonte: a Autora (2023)

Figura 31 - PREPARO DAS CÉLULAS

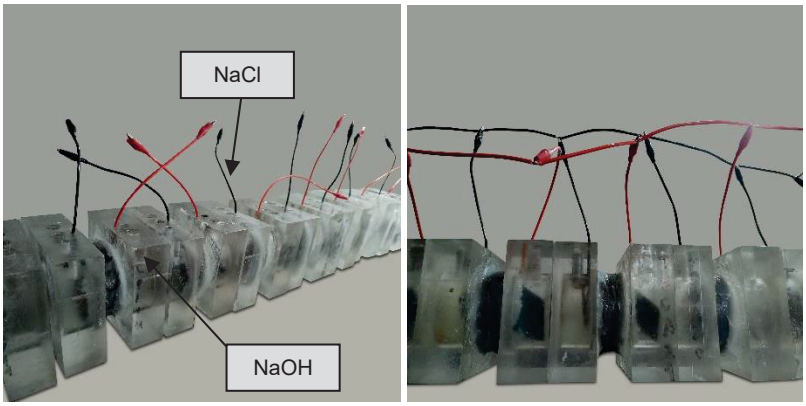


Fonte: a Autora (2023)

A ASTM C1202 (2022) prescreve que seja aplicada uma diferença de potencial (ddp) de 60 V durante 6 horas, medindo-se a corrente passante a cada 30 minutos. O processamento dos dados fornece o resultado em quantidade de carga elétrica. Sobre as leituras de modo isolado, aplica-se a Segunda Lei de Ohm e logo em seguida, o fator geométrico de correção. Após essa etapa, aplica-se o tratamento estatístico.

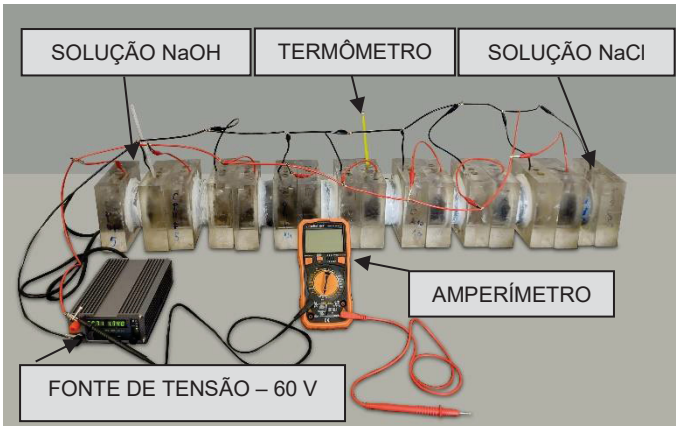
As Figura 32 ilustra a configuração de montagem das células no preparo para o início do ensaio. Em um dos lados da célula, identificado com fiação vermelha, foi colocada a solução de NaOH e, no outro, com fiação preta, foi colocada a solução NaCl. A Figura 33 apresenta a disposição final das células, fonte e amperímetro.

Figura 32 - MONTAGEM DO ENSAIO



Fonte: a Autora (2023)

Figura 33 - DISPOSIÇÃO PARA INÍCIO DAS LEITURAS DO ENSAIO



Fonte: a Autora (2023)

3.3.2.5. Permeabilidade ao ar

A permeabilidade do concreto pode ser determinada a partir de ensaios normatizados como o da permeabilidade à água, absorção por capilaridade e por imersão. Também, outro método que pode ser utilizado é o idealizado por Torrent (MEDEIROS *et al*., 2017). Com esse método é aferida, indiretamente, a porosidade de uma camada superficial concreto, de forma não destrutiva, controlada e de baixo custo de implementação (ADÁMEK; JURÁNKOVÁ, 2010; SENTONE, 2011).

Com o uso do Método Torrent, são obtidos dados do coeficiente de permeabilidade (kT), espessura da camada onde se tem a leitura (L), da pressão (Pi) e do tempo de leitura em segundos (SENTONE, 2011).

O Método de Torrent consiste no uso de uma câmara de célula dupla (interna e externa) onde é produzida uma pressão negativa, com auxílio de uma bomba a vácuo, sob a superfície do material que se deseja ensaiar. O ensaio começa a partir do ponto máximo de pressão negativa permitido pela configuração do ensaio (aproximadamente 30 mbar). Nesse momento, a câmara interna começa a recuperar pressão até atingir o equilíbrio com a pressão atmosférica. A câmara externa tem sua pressão regulada durante todo o ensaio, por meio de um regulador que mantem as pressões entre as duas câmaras iguais, a fim de excluir qualquer interferência de ar que possa vir da superfície, tornando o fluxo teoricamente unidirecional. O ensaio tem duração de 360 s, ou até que a pressão da câmara interna se iguale a 20 mbar (SENTONE, 2011).

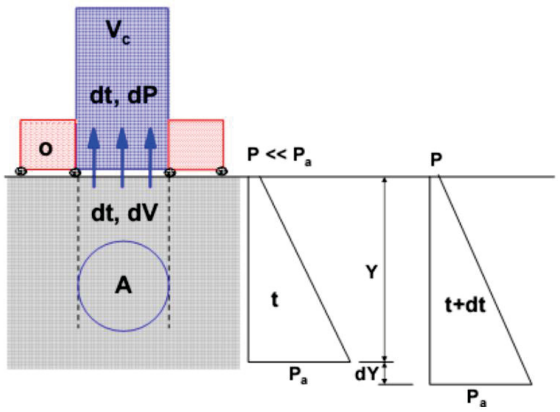
O método foi incluído em 2003 na norma suíça (SIA 262, 2003) de especificações para construções de concreto para avaliação quanto à permeabilidade

ao ar; durabilidade (SENTONE, 2011; STARCK *et al*., 2017). O procedimento se mostra sensível às propriedades intrínsecas e extrínsecas do concreto, incluindo relação água/cimento, tipo de cimento e ambiente de cura.

O autor do método assume que a estrutura é homogênea e isotrópica, caso em que a porosidade não muda (consequentemente a permeabilidade também não) ao longo do corpo de prova. A pressão da câmara externa é exatamente a mesma que a da interna ao longo de todo o ensaio; o que promove o fluxo laminar perpendicular à direção núcleo/superfície do corpo de prova. Depois de aplicada uma pressão negativa entre a superfície e as câmaras, o diagrama de pressão ao longo do corpo de prova é equivalente ao apresentado na Figura 34 (SENTONE, 2011).

A Figura 34 apresenta o diagrama de pressões considerado no Mètodo Torrent.

Figura 34 - DIAGRAMA DE PRESSÕES ASSUMIDO PELO MÉTODO DE TORRENT ONDE A PRESSÃO INTERNA DA CÂMARA (P) É MENOR QUE A PRESSÃO ATMOSFÉRICA (PA) DURANTE FLUXO



Fonte: Torrent (2010)

O fluxo de ar ao interior da câmera então é descrito através da equação de Hagen-Poiseuille para fluidos compressíveis, combinada a equação geral dos gases de Clapeyron, resultando então, após integrações e rearranjos, conforme a Equação 08 (SENTONE, 2011).

$$kT = \left(\frac{Vc}{A}\right)^2 \frac{\mu}{2\,\varepsilon\,Pa} \left(\frac{lnln\frac{Pa+\Delta Pi}{Pa-\Delta Pi}}{\sqrt{tf}-\sqrt{t0}} \right)^2 \quad (08)$$

Em que:

kT é o coeficiente de permeabilidade ao ar de Torrent (m²);

Vc o volume útil da câmara interna (m³);

A a seção transversal útil da câmara interna (m²);

μ a viscosidade do ar (N.s/m²);

ε a porosidade estimada da superfície do concreto (que é considerada como 0,15);

Pa a pressão atmosférica (N/m²);

tf é o tempo final do teste (s);

t0 o tempo inicial do teste (s);

Δpi é a variação de pressão no interior da câmara até o tempo tf a (N/m²).

A empresa Proceq possui um dispositivo que afere a permeabilidade ao ar de forma rápida e não destrutiva. A medição leva, em média, 2 a 12 minutos. O equipamento pode ser visualizado na Figura 35.

Figura 35 - EQUIPAMENTO TORRENT EM OPERAÇÃO

Fonte: a Autora (2023)

O aparelho registra a mudança de pressão na célula durante o teste e calcula o valor do coeficiente de permeabilidade kT, a profundidade L do concreto penetrada pelo vácuo (que, geralmente, varia de 10 a 70 mm), que aumenta com o valor de kT (EBENSPERGER; TORRENT, 2014; KUBISSA *et al*., 2021).

A classificação da qualidade da cobertura do concreto se dá em 5 categorias, conforme Tabela 10. Para cada classe, é dado um intervalo de valores do coeficiente de permeabilidade determinado no concreto após a idade de 28 dias de cura.

Tabela 10 - CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA COBERTURA DO CONCRETO SEGUNDO KT

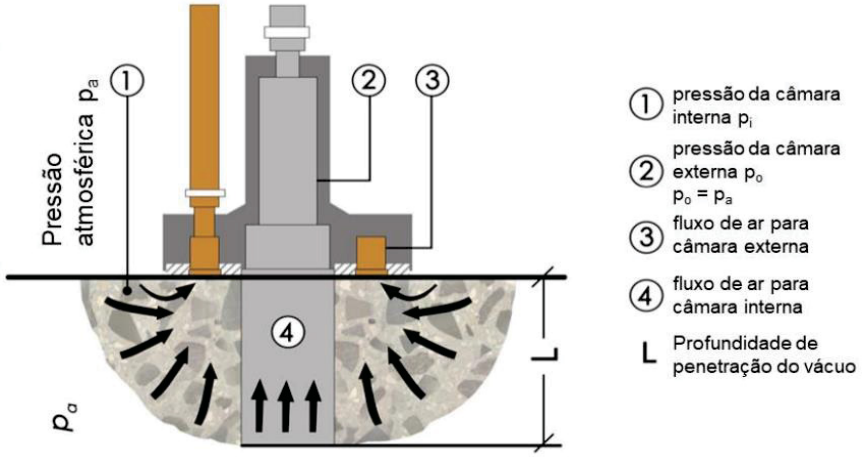
	Classificação da qualidade da cobertura do concreto	**kT medido aos 28 dias (E^{-16} m^2)**
1	Muito boa	kT < 0,01
2	Boa	0,01 < kT < 0,1
3	Normal	0,1 < kT < 1,0
4	Ruim	1,0 < kT < 10
5	Muito ruim	kT > 10

Fonte: ADÁMEK; JURÁNKOVÁ, 2010

O coeficiente de permeabilidade kT é válido para concretos secos. Quando o concreto está molhado ou existam dúvidas a respeito disso, o Método de Wenner, que afere a resistividade elétrica, é usado (ADÁMEK; JURÁNKOVÁ, 2010).

A Figura 36 representa o ensaio de permeabilidade com o equipamento *Torrent Permeability Test*.

Figura 36 - DIAGRAMA OPERACIONAL - TORRENT



Fonte: Gurdián *et al*. (2021)

Para obter valores reprodutíveis e precisos do coeficiente de permeabilidade ao ar, algumas recomendações sobre o desempenho das medições e a avaliação dos dados são fornecidas por Denarié *et al*. (2011):

- A temperatura do elemento de concreto (aferida com termômetro infravermelho) deve estar entre 5 – 10 °C;
- Teor de umidade não deve exceder 5,5% em massa;
- Resistividade elétrica medida pela sonda Wenner (fabricada pela Proceq) não deve estar abaixo de 10 ou 20 kΩcm a 20°C.

O teste de permeabilidade ao ar foi realizado por meio do Método Torrent, com uso do equipamento Proceq. Foram utilizados 04 corpos de prova cilíndricos secos de cada traço, com medidas Ø 150 x 300 mm.

Os corpos de prova foram submetidos à cura submersa. Antes do experimento, as amostras foram secas em estufa a 50 ^{o}C por 48h, conforme o proposto por Adámek e Juránková (2010) e Ebensperger e Torrent (2014). Cada amostra foi testada duas vezes e em duas idades, a primeira vez com 28 dias de idade, e a segunda vez com 91 dias de idade.

Segundo Ebensperger e Torrent (2014) é o método adequado para medir a resistência do recobrimento de concreto com o ingresso de agentes agressivos que afetar a durabilidade. Tem correlação com outros métodos para verificação de fenômenos internos de transporte no concreto, tendo a vantagem de ser rápido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

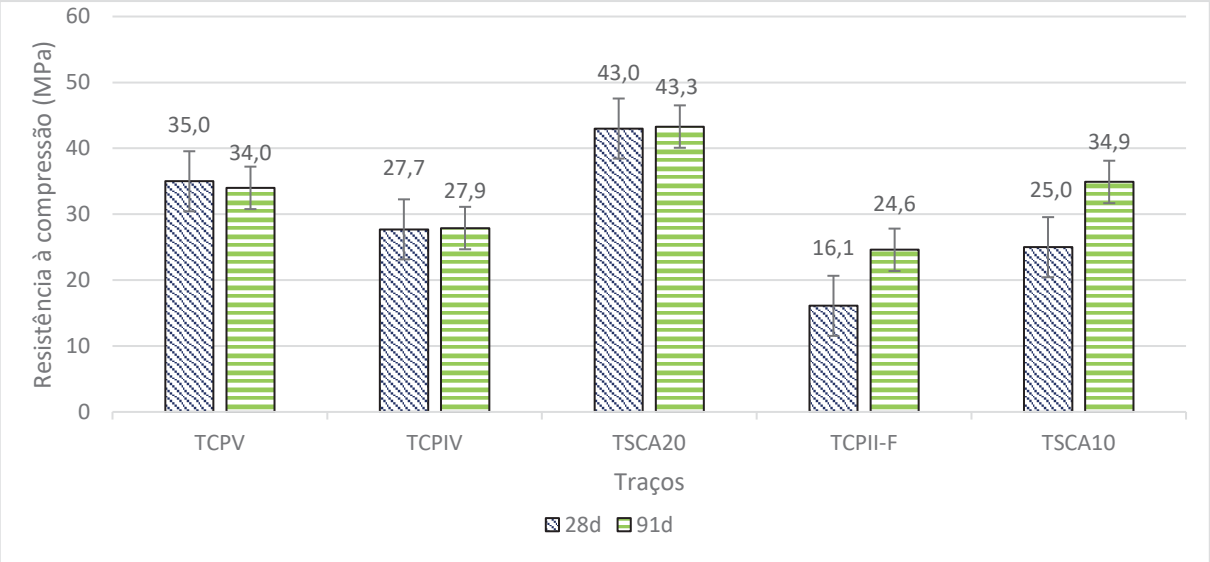
O objetivo desta pesquisa é avaliar a ecoeficiência do concreto e as possíveis relações com resistência mecânica e parâmetros que indiquem a durabilidade do concreto. Para isso, foram utilizadas cinco proporções de mistura, sendo elas executadas com CPV, CPIV, CPII-F e teores de substituição de 10 e 20% de CPV substituição do cimento Portland por sílica de casca de arroz.

Os resultados referem-se a ensaios realizados aos 07, 14, 21, 28, 56 e 91 dias de idade das amostras, sendo eles: resistência à compressão, resistência à penetração de cloretos, resistividade elétrica superficial e resistividade elétrica volumétrica, absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao ar.

4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 28 e 91 dias de tempo de cura do concreto, e conforme prescreve a NBR 5739 (ABNT, 2018b). As médias dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão estão apresentadas na Figura 37, que reúne os cinco traços ensaiados.

Figura 37 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - 28 E 91 DIAS - 05 TRAÇOS



Fonte: a Autora (2023)

Comparando-se os resultados obtidos nos ensaios aos 28 e 91 dias, foi constatada diminuição da resistência à compressão para o traço TCPV (o que contraria o esperado, contudo quando comparados estatisticamente, verifica-se que

os resultados não possuem diferença) e aumento da resistência à compressão para os traços TCPIV, TSCA20, TCPII-F e TSCA10. Os maiores valores obtidos nas idades consideradas (28 e 91 dias) correspondem ao traço TSCA20.

A partir da análise de variância (ANOVA, pode-se constatar que há diferença estatística entre os resultados. Após aplicação de ANOVA (α = 5%) com Teste de Tukey (q5% (5,15) = 4,37), obteve-se a Diferença Mínima Significativa DMS= 10,37 MPa para 28 dias; enquanto que, para 91 dias, a Diferença Mínima Significativa foi equivalente a 13,83 MPa.

Observou-se, então, que há diferença estatística, aos 28 dias, aos pares, entre os resultados dos traços TSCA20 e TCPIV, TSCA20 e TSCA10, TSCA20 e TCPII-F, TCPV e TCPII-F, TCPIV e TCPII-F. Aos 91 dias, há diferença significativa entre os resultados obtidos para os traços TSCA20 e TCPIV, TSCA20 e TCPII-F.

Após a análise estatística, dentre os traços que demonstraram diferença entre si aos 28 dias, a única diferença significativa em relação ao traço de referência foi correspondente ao TCPII-F, com 54% de diminuição da resistência. Quanto aos 91 dias, estatisticamente não foi identificada diferença entre os valores.

O maior crescimento entre as idades de 28 a 91 dias foi registrado para o traço TCPII-F, com ganho de 52,80%. Em seguida, o maior aumento corresponde ao TSCA10, com ganho de 39,6%, sendo que, para o TCPIV, a elevação foi de apenas 0,72%. A dosagem de referência registrou diminuição de 2,85%, enquanto que a do traço TSCA20, registrou aumento de 0,70% entre as duas idades consideradas.

Para os 28 dias, a resistência à compressão pode ser disposta em ordem crescente da seguinte maneira: TCPII-F < TSCA10 < TCPIV < TCPV < TSCA20. Verifica-se que o traço executado com substituição de 20% de cimento Portland por sílica de casca de arroz resultou na maior média de valores de resistência à compressão (43,0 MPa), seguido pelo traço de referência (35,0 MPa), TCPIV (27,7 MPa), TSCA10 (25,0 MPa) e TCPII-F (16,1MPa).

Aos 91 dias, houve alteração na sequência de crescimento da resistência à compressão: TCPII-F < TCPIV < TCPV < TSCA10 < TSCA20. Verifica-se que o traço executado com substituição de 20% de cimento Portland por sílica de casca de arroz resultou na maior média de valores de resistência à compressão (43,3 MPa), seguido pelo traço com substituição parcial ao cimento Portland por 10% sílica de casca de arroz, em volume (34,9 MPa) e, depois, pelo traço TCPV (34,0 MPa), TCPIV (27,9 MPa), e TCPII-F (24,6 MPa).

Medeiros-Junior *et al*. (2014) concluíram que os tipos de cimento têm influência direta sobre os resultados da resistência à compressão.

O comportamento de redução da resistência à compressão do traço com substituição de 10% do cimento Portland por sílica de casca de arroz em relação ao traço de referência aos 28 dias também foi obtido por Araújo *et al*. (2022), com diminuição equivalente a 6,83% para o mesmo teor de substituição (sendo 65,92 MPa a resistência obtida por esses autores para o traço de referência); isso também foi percebido por Real (2015), com decréscimo de 7,58%.

Assim como o obtido no experimento de resistência à compressão deste trabalho, Medeiros-Junior *et al*. (2019), que utilizou cinza volante, Ramezanianpour *et al*. (2009) e Hoppe (2005), que utilizaram cinza de casca de arroz, também verificaram maiores resultados da resistência à compressão para concretos com pozolanas em substituição ao cimento Portland (o traço TSCA20 neste trabalho foi equivalente aos maiores valores de resistência nas duas idades consideradas).

Valdes *et al*. (2017), com substituição de 30% ao cimento Portland por sílica de casca de arroz, obtiveram resistência à compressão aos 28 e 91 dias superiores em relação ao de referência (assim como o registrado pela Figura 37), com médias significativas ao longo das idades consideradas, sendo a maior média aferida aos 91 dias, 59,20 MPa.

Farias (2020) obteve, para relação água/cimento equivalente a 0,55, 30,0 MPa de resistência aos 28 dias para o traço de referência (resultado próximo ao obtido por este trabalho), e superior, também, ao traço executado com cimento CPII-F.

Rodrigues (2023) pode verificar em seu estudo que o CPV apresentou maior resistência à compressão dentre os testes do respectivo programa experimental e atribuiu esse fato aos elevados valores de áreas específicas, promovendo maior quantidade de hidratação do cimento nas primeiras idades. Já com CPII-F, percebeu que houve registro de menor resistência à compressão, pela presença de filer inerte e, com isso, justificou crescimento dos valores para esse traço dos 28 aos 91 dias; validando o que também foi encontrado por esta pesquisa.

4.2. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E POROSIDADE

Para os 28 dias, os traços TCPIV e TCPII-F, TSCA10 e TSCA20, TSCA10 e TCPV, TSCA20 e TCPV apresentaram absorções estatisticamente equivalentes se

analisados aos pares, segundo o Teste de Tukey. Para os 91 dias, os traços TCPII-F e TCPIV não apresentaram diferença estatística entre si, os demais todos foram enquadrados como estatisticamente diferentes, inclusive em relação ao traço de referência.

O traço que apresentou a menor absorção por imersão aos 28 dias foi o TCPV, traço de referência. A segunda menor absorção foi registrada para o traço TSCA20, sendo 6,91% maior que a do traço de referência (estatisticamente igual ao TCPV). Em seguida, TSCA10, com aumento em relação ao TCPV de 14,71%, TCPII-F com aumento de 66,37% e TCPIV, com aumento de 83,78%.

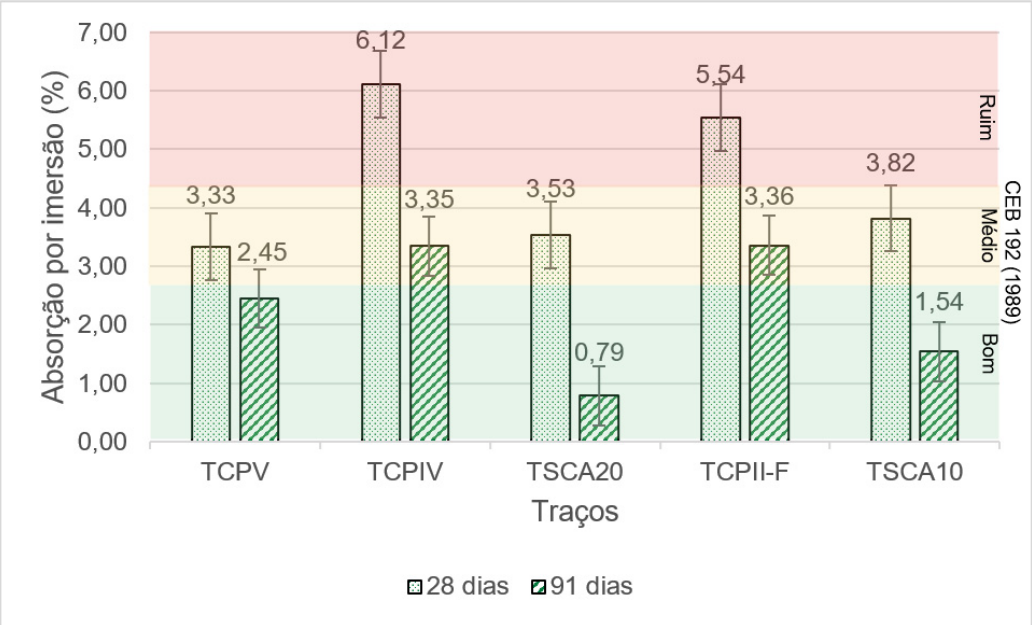
Aos 91 dias, a menor absorção foi registrada para a TSCA20, com redução de 67,75% em relação ao traço de referência. Em seguida, o traço TSCA10, com redução de 37,14% se comparado ao traço de referência; depois, TCPIV, com aumento de 36,73% em relação ao traço de referência e TCPII-F, com aumento de 37,14% em relação ao traço de referência.

A Figura 38 mostra a variação da absorção por imersão aos 28 e 91 dias para os traços considerados. À direita, está disposta a classificação do CEB 192 (1989) quanto à qualidade do concreto em função da absorção de água por imersão.

No estudo de Hoppe (2005), foi descrito que adições pozolânicas oferecem refinamento e melhor distribuição dos poros na microestrutura da pasta, o que a torna mais densa, influenciando a permeabilidade.

A Tabela 11 apresenta o resumo dos resultados, por traço, quanto à absorção por imersão e índice de vazios

Figura 38 - RESULTADOS MÉDIOS DA ABSORÇÃO POR IMERSÃO - IDADES DE 28 DIAS E 91 DIAS



Fonte: a Autora (2023)

Tabela 11 - RESUMO DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

	28 dias		91 dias	
Traço	Absorção por imersão (%)	Índice de vazios	Absorção por imersão (%)	Índice de vazios
TCPV	3,33	6,48	2,45	5,50
TCPIV	6,12	11,51	1,27	3,35
TSCA20	3,53	6,98	0,81	1,73
TCPII-F	5,54	11,40	3,38	7,58
TSCA10	3,82	8,14	1,52	3,53

Fonte: a Autora (2023)

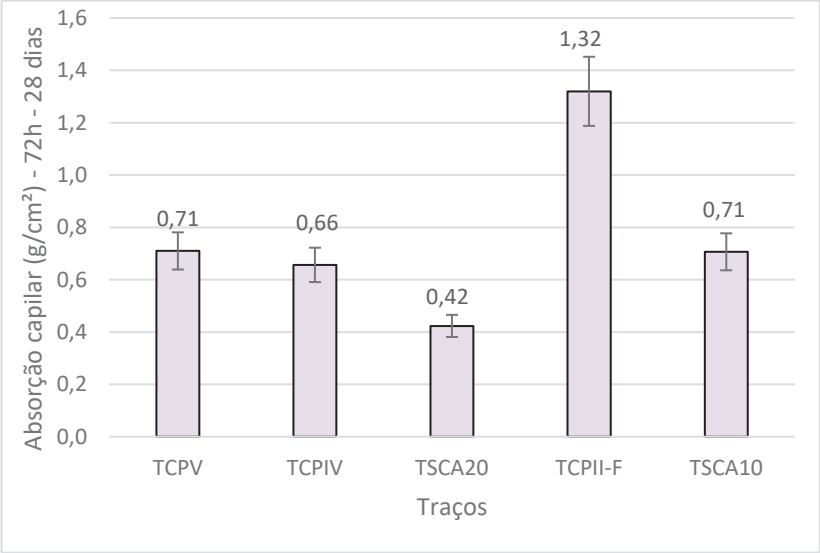
Farias (2020) estudou o efeito da relação água/cimento e teor de agregados na absorção de água por imersão. Para relação água/cimento entre 0,50 e 0,60, traço com CPII-F, a variação da absorção de água por imersão ocorreu entre os valores 5,06 e 6,21% aos 28 dias, limite que este trabalho também se encaixa. Conforme o que também foi obtido por Rodrigues (2023), a absorção e índice de vazios do concreto diminuíram com o avanço da idade das amostras.

4.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Após aplicação de ANOVA (α = 5%) com Teste de Tukey ($q_{5\%}$ (5,15) = 4,37), foi possível constatar que não há diferença estatística significativa entre os valores obtidos para as verificações às 72h, aos 28 dias, em relação ao traço de referência. Com o uso do Teste de Tukey, para os resultados finais do ensaio, pode-se verificar que, aos 28 dias, entre os traços TCPII-F e TCPV, TCPII-F e TCPIV e TCPII-F e TSCA20 há diferença estatística.

As aferições podem ser analisadas na Figura 39 - ABSORÇÃO CAPILAR – LEITURA 72h – 28 DIASFigura 39Figura 39.

Figura 39 - ABSORÇÃO CAPILAR – LEITURA 72h – 28 DIAS



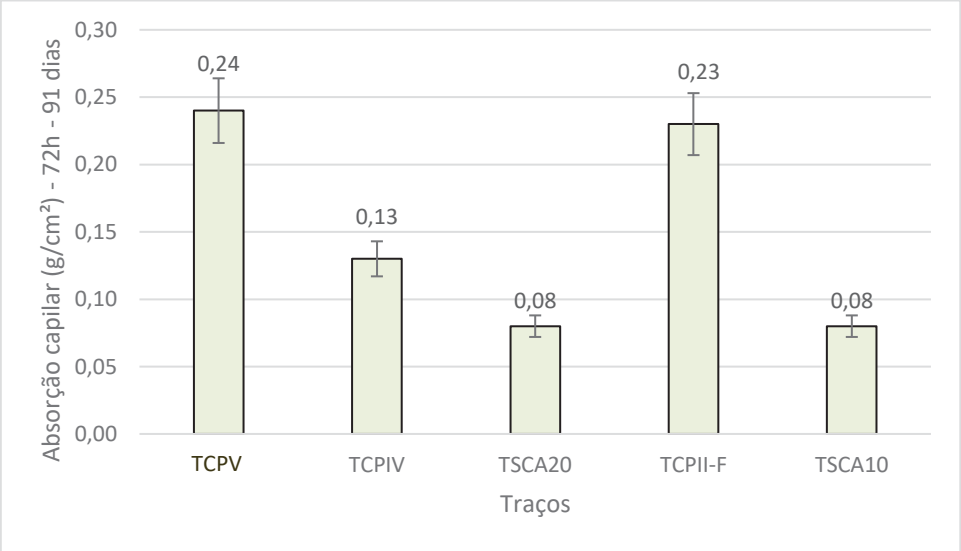
Fonte: a Autora (2023)

- 72h: TSCA20 (0,42 g/cm² - diminuição de 40,85% em relação ao traço de referência) < TCPIV (0,66 g/cm² - diminuição de 7,04% em relação ao traço de referência) < TCPV (0,71 g/cm²) < TSCA10 (0,71 g/cm² - igual ao traço de referência < TCPII-F (1,32 g/cm² - aumento de 85,92% em relação ao traço de referência.

Pode-se analisar o que a Figura 40 apresenta o comparativo dos resultados para o momento final (72h) do ensaio de capilaridade para a segunda idade considerada. Aos 91 dias, foi constatado que há diferença estatística entre os traços TPCII-F e TCPIV, TCPII-F e TSCA10, TCPII-F e TSCA20, TCPV e TSCA20.

- 72h: TSCA20 (0,08 g/cm² - diminuição de 66,67% em relação ao traço de referência) = TSCA10 (0,08 g/cm²) < TCPIV (0,13 g/cm² - diminuição de 45,83% em relação ao traço de referência) < TCPII-F (0,23 g/cm² - diminuição de 4,17% em relação ao traço de referência) < TCPV (0,24 g/cm² - referência).

Figura 40 - ABSORÇÃO CAPILAR – LEITURA 72h – 91 DIAS

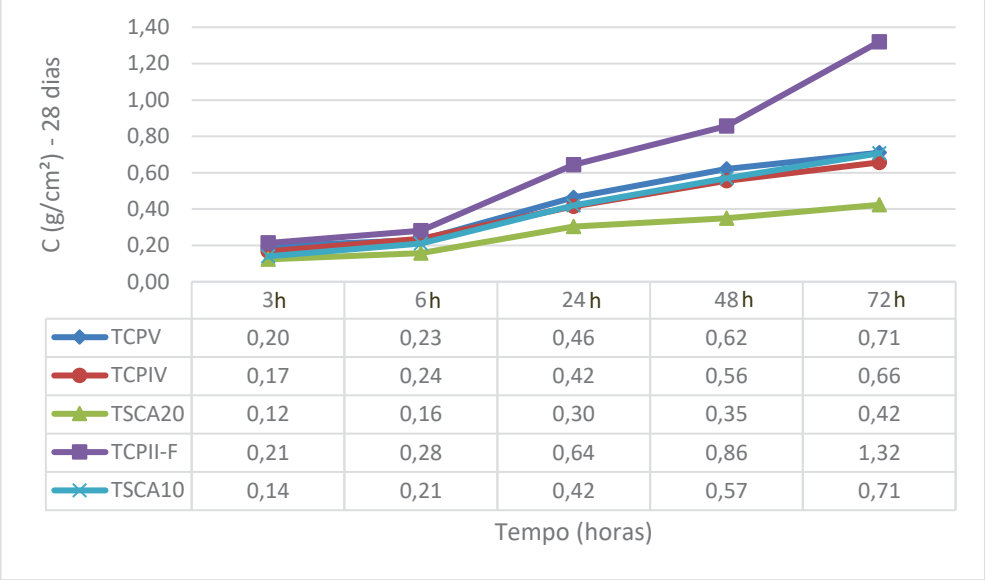


Fonte: a Autora (2023)

A

Figura 41 mostra a evolução dos resultados de absorção capilar ao longo do ensaio, com medições às 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, para a idade de 28 dias das amostras.

Figura 41 - RESULTADOS MÉDIOS DAS AMOSTRAS - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE – 28 DIAS

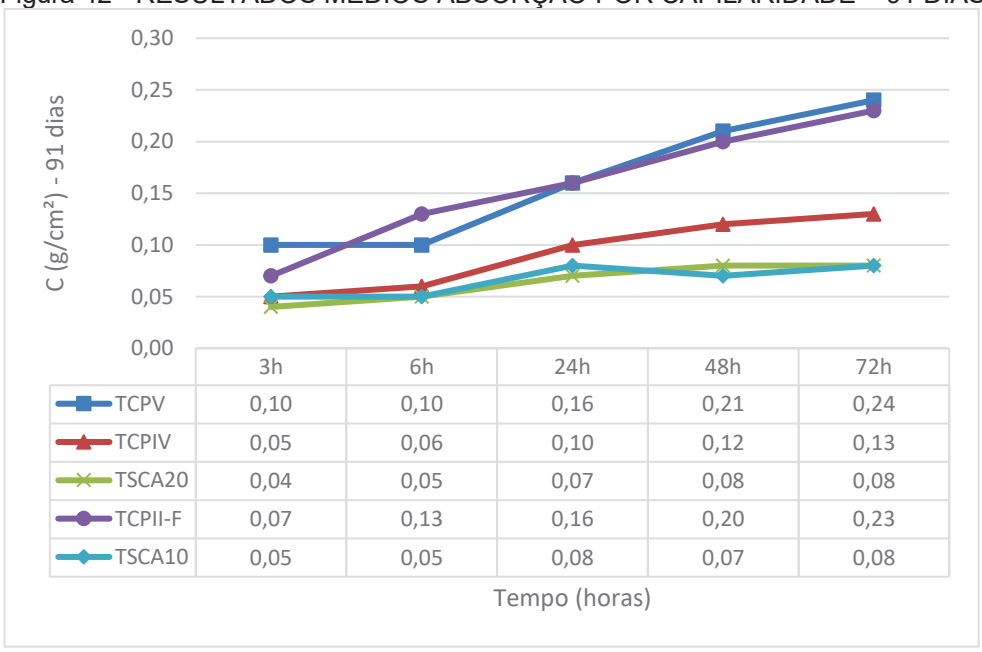


	3h	6h	24h	48h	72h
TCPV	0,20	0,23	0,46	0,62	0,71
TCPIV	0,17	0,24	0,42	0,56	0,66
TSCA20	0,12	0,16	0,30	0,35	0,42
TCPII-F	0,21	0,28	0,64	0,86	1,32
TSCA10	0,14	0,21	0,42	0,57	0,71

Fonte: a Autora (2023)

A Figura 42 mostra a evolução dos resultados de absorção capilar ao longo do ensaio, com medições às 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, para a idade de 91 dias das amostras.

Figura 42 - RESULTADOS MÉDIOS ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE – 91 DIAS



	3h	6h	24h	48h	72h
TCPV	0,10	0,10	0,16	0,21	0,24
TCPIV	0,05	0,06	0,10	0,12	0,13
TSCA20	0,04	0,05	0,07	0,08	0,08
TCPII-F	0,07	0,13	0,16	0,20	0,23
TSCA10	0,05	0,05	0,08	0,07	0,08

Fonte: a Autora (2023)

Menores resultados de absorção capilar para misturas com adição de cinza de casca foram encontrados por Neto (2011), assim como neste trabalho. Esse autor atribui o comportamento à uma influência positiva da maior área superficial da cinza

na microestrutura com reflexo no comportamento da absorção capilar; modificações na estrutura dos poros das amostras investigadas (distribuição, diâmetro, por exemplo). Ainda, relatou observações de que quanto mais elevado teor da substituição de cimento por cinza de casca de arroz, menor foi absorção capilar.

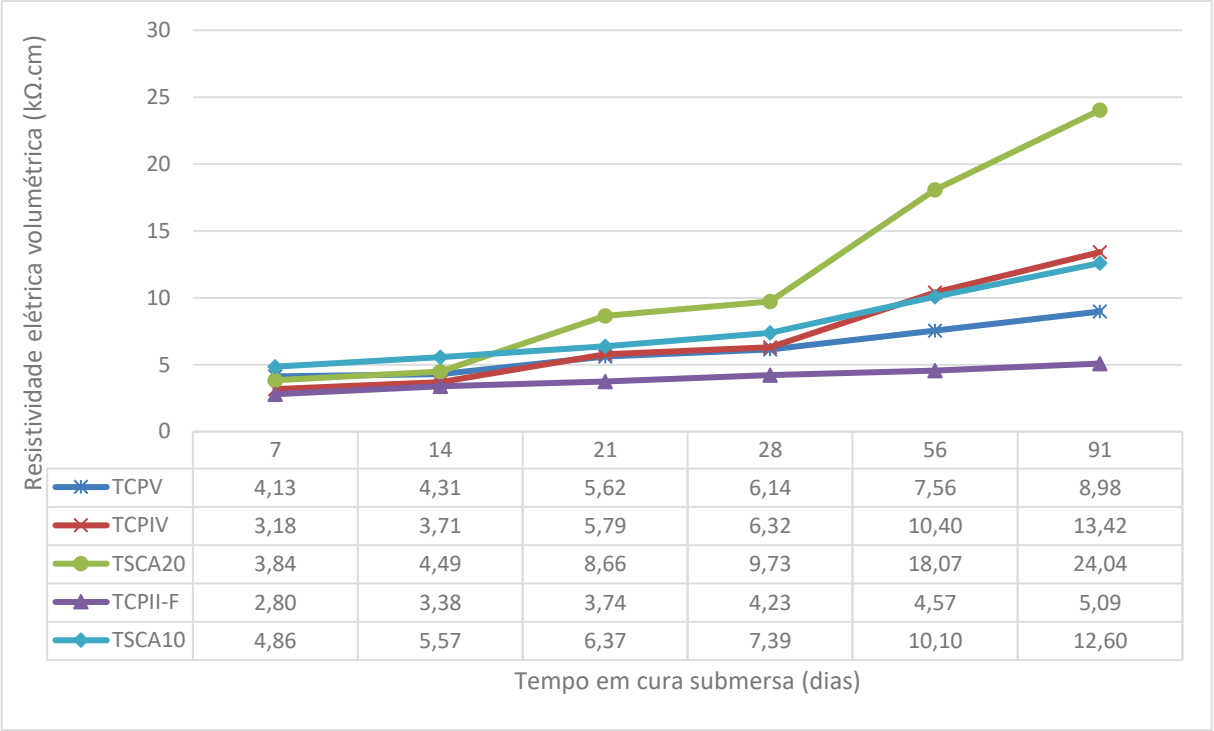
Contudo, para Araújo *et al.* (2022), a absorção por capilaridade foi aferida aos 56 dias de idade das amostras; os autores discutiram que a substituição de cimento Portland por sílica de casca de arroz não alterou a absorção, justificando que a reação pozolânica de 56 dias é capaz de diminuir apenas a fração de microporos, não interferindo demasiadamente na absorção.

4.4. RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA (REV)

A Figura 43 mostra a resistividade elétrica volumétrica (REV) para as cinco proporções de mistura deste experimento com medições realizadas no concreto saturado. Observa-se que o maior valor de REV aos 07 dias foi obtido para o traço TSCA10, seguido pelo traço de referência, depois pelo TSCA20, TCPIV e TCPII-F.

Aos 14 dias, o resultado crescente foi equivalente a TCPII-F < TCPIV < TCPV < TSCA20 < TSCA10. Por sua vez, aos 21 dias, TCPII-F < TCPV < TCPIV < TSCA10 < TSCA20; aos 28 dias, TCPII-F < TCPV < TCPIV < TSCA10 < TSCA20; aos 56 dias, TCPII-F < TCPV < TSCA10 < TCPIV < TSCA20; e aos 91 dias, TCPII-F < TCPV < TSCA10 < TCPIV < TSCA20.

Figura 43 - EVOLUÇÃO DA REV AO LONGO DO TEMPO PARA AS CINCO PROPORÇÕES DE MISTURA, FREQUÊNCIA DE 700 Hz NO GERADOR DE FUNÇÕES (FONTE DE TENSÃO GERANDO SINAIS DE ONDA SENOIDAL COM AMPLITUDE DE ONDA IGUAL A 20 V)



	7	14	21	28	56	91
TCPV	4,13	4,31	5,62	6,14	7,56	8,98
TCPIV	3,18	3,71	5,79	6,32	10,40	13,42
TSCA20	3,84	4,49	8,66	9,73	18,07	24,04
TCPII-F	2,80	3,38	3,74	4,23	4,57	5,09
TSCA10	4,86	5,57	6,37	7,39	10,10	12,60

Fonte: a Autora (2023)

Após aplicação de ANOVA (α = 5%) com Teste de Tukey ($q_{5\%}$ (5,15) = 4,37), obteve-se:

I. Para 07 dias, Diferença Mínima Significativa DMS = 0,28 kΩcm, sendo que não há diferença estatística entre o traço TCPV e TSCA20, bem como entre o traço TCPII-F e o TCPIV;

II. Para 14 dias, Diferença Mínima Significativa DMS = 0,84 kΩcm, sem diferença estatística entre TSCA10 e TSCA20, TSCA20 e TCPV, TCPV e TCPIV, TCPIV e TCPII-F;

III. Para 21 dias, Diferença Mínima Significativa DMS = 0,36 kΩcm, sem diferença estatística entre os traços TCPV e TCPIV;

IV. Para 28 dias, Diferença Mínima Significativa DMS = 0,47 kΩcm, sem diferença estatística entre os traços TCPV e TCPIV;

V. Para 56 dias, Diferença Mínima Significativa DMS = 0,50 kΩcm, sem diferença estatística entre os traços TSCA10 e TCPIV;

VI. Para 91 dias, Diferença Mínima Significativa DMS = 0,77 kΩcm, com diferença estatística entre todos os traços.

A Tabela 12 apresenta as diferenças obtidas entre os resultados ensaiados em relação ao traço de referência.

Tabela 12 - DIFERENÇAS PERCENTUAIS DOS TRAÇOS ENSAIADOS À REV EM RELAÇÃO AO TRAÇO DE REFERÊNCIA (TCPV)

	07 dias	14 dias	21 dias	28 dias	56 dias	91 dias
TCPV	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.
TCPIV	**-22,44**	**-13,72**	**3,02**	**3,61**	**36,84**	**49,55**
TSCA20	**-6,34**	**13,95**	**54,09**	**59,51**	**137,76**	**167,71**
TCPII-F	**-23,66**	**-21,40**	**-33,45**	**-29,18**	**-39,74**	**-43,32**
TSCA10	**18,54**	**20,00**	**13,35**	**21,15**	**32,89**	**40,31**

Fonte: a Autora (2023)

Para o traço com cimento CPV, relação água/cimento 0,55, Farias (2020) obteve, aos 28 dias, resistividade elétrica obtida pelo método direto de 5,7 kΩcm, enquanto que a obtida neste trabalho foi correspondente a 6,14 kΩcm, valores próximos. Já para 56 dias, Farias (2020) obteve resultado para o traço de referência equivalente a 6,7 kΩcm, e o presente trabalho, 7,56 kΩcm. Farias (2020) ainda pondera que, de modo geral, a resistividade elétrica do traço executado com CPV foi superior às demais misturas executadas (que, naquele caso, correspondiam a variações que utilizaram CPII-F e CPII-Z). O presente trabalho também identificou maiores valores de resistividade elétrica para o traço de referência se comparado com o traço executado com cimento CPII-F, estando os dois estudos de acordo.

Segundo Whintington *et al*. (1981) apud Farias (2020), a resistividade está diretamente relacionada ao progresso de hidratação da pasta de cimento, e ao tempo de cura do concreto. Na presente pesquisa, houve aumento da resistividade elétrica dos traços ao longo das idades, confirmando que a hidratação do cimento tem efeito sobre a resistividade; tendência que foi também observada por Farias (2020).

Polder *et al*. (1991) apud Farias (2020) relataram que a resistividade de concretos produzidos com teores de material pozolânico chegaram a valores de até 3 ou 4 vezes os obtidos para concretos sem adições. As reações pozolânicas, na transformação de hidróxido de cálcio em produtos hidratados C-S-H, geram uma solução aquosa dentro do concreto com menos íons hidroxila (OH-), diminuindo concentrações iônicas e, consequentemente, aumentando a resistividade elétrica.

Hoppe (2005) também atribuiu tal comportamento (progressão dos valores com avanço da idade das amostras com a presença de materiais pozolânicos) à melhora no refinamento dos poros do concreto, que favorece maior resistividade; há um

consumo de íons Ca^{2+}, devido às reações pozolânicas e refinamento desses poros, corroborando com os mais altos valores obtidos para os concretos com adição de sílica de casca de arroz deste trabalho.

4.5. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL (RES)

Foram realizadas leituras de resistividade elétrica superficial (RES) de acordo com a norma UNE 83988-2:2014, com os corpos de prova na condição de saturados com superfície seca.

As médias dos resultados obtidos para a resistividade elétrica superficial dos cinco traços, após cura submersa e idades de 07, 14, 21, 28, 56 e 91 dias estão apresentadas na Figura 44. Pode-se constatar que, assim como no caso da REV, a RES aumentou ao longo do tempo para todos os traços dosados. Além disso, a partir da análise de variância (ANOVA), é possível afirmar que o aumento da RES nas idades consideradas foi estatisticamente significativo.

Pode-se verificar que, aos 07 dias, os maiores valores de RES foram obtidos a partir do traço TSCA10, seguido pelo traço de referência, TSCA20, TCPII-F e TCPIV. Aos 14 dias, a maior média corresponde ao TSCA10 seguido pelo TSCA20, TCPV, TCPIV e TCPII-F. Aos 21 dias, a ordem decrescente de resultados é: TSCA20 > TSCA10 > TCPV > TCPIV > TCPIIF; aos 28 dias TSCA20 > TSCA10 > TCPV > TCPIV > TCPII-F. Aos 56 dias, TSCA20 > TSCA10 > TCPIV > TCPV > TCPII-F. Aos 91 dias, TSCA20 > TCPIV > TSCA10 > TCPV > TCPII-F.

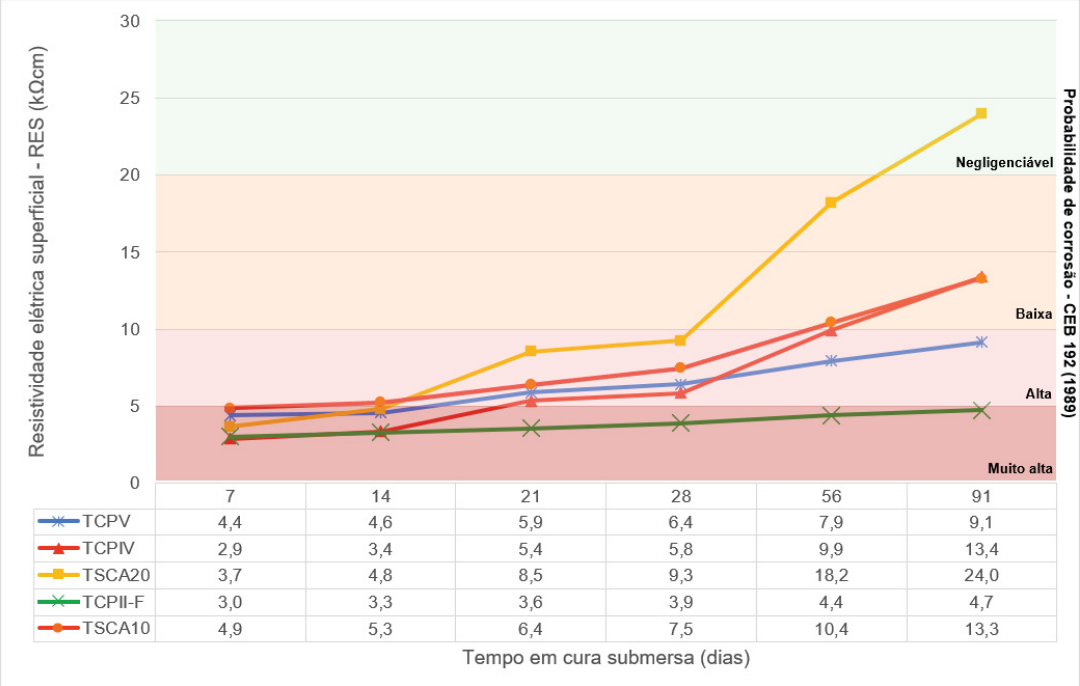
Considerando o CEB 192 (1989), pode-se verificar:

I. Aos 07 dias, todos os traços enquadraram-se na faixa de alta probabilidade de corrosão;
II. Aos 14 dias, os traços TCPII-F, TCPIV, TCPV e TSCA20 enquadraram-se na faixa de muito alta probabilidade de corrosão, enquanto que o traço TSCA10 na faixa de alta probabilidade de corrosão;
III. Aos 21 dias, o traço TCPII-F enquadrou-se na faixa de risco de corrosão muito alto, enquanto que os demais traços foram abrangidos pela faixa de alta probabilidade;
IV. Aos 28 dias, o traço TCPII-F foi classificado na faixa de muito alta probabilidade de corrosão, enquanto que os traços restantes foram enquadrados na categoria de alto risco;

V. Aos 56 dias, o traço TCPII-F foi enquadrado na faixa de muito alta probabilidade de corrosão, enquanto que os traços TCPIV e TCPV estavam na faixa de alta probabilidade de corrosão, e os traços TSCA10 e TSCA20 na faixa de baixa probabilidade de corrosão;

VI. Aos 91 dias, o traço TCPII-F ainda estava classificado na faixa de probabilidade de corrosão muito alta, TCPV na faixa de alta probabilidade, TCPIV e TSCA10 na faixa de baixo risco de corrosão, TSCA20 na faixa negligenciável.

Figura 44 - EVOLUÇÃO DA RES AO LONGO DO TEMPO PARA AS CINCO PROPORÇÕES DE MISTURA



	7	14	21	28	56	91
TCPV	4,4	4,6	5,9	6,4	7,9	9,1
TCPIV	2,9	3,4	5,4	5,8	9,9	13,4
TSCA20	3,7	4,8	8,5	9,3	18,2	24,0
TCPII-F	3,0	3,3	3,6	3,9	4,4	4,7
TSCA10	4,9	5,3	6,4	7,5	10,4	13,3

FONTE: a Autora (2023)

Após aplicação de ANOVA (α = 5%) com Teste de Tukey ($q_{5\%}$ (5,15) = 4,37), obteve-se:

I. Diferença Mínima Significativa DMS = 1,05 kΩcm para 07 dias de idade das amostras. Observou-se, então, que há diferença estatística entre todos os resultados;

II. Diferença Mínima Significativa DMS = 0,91 kΩcm para 14 dias de idade das amostras. Não há diferença estatística entre os traços TSCA20 e TCPV, assim como entre os traços TCPIV e TCPII-F;

III. Diferença Mínima Significativa DMS = 0,84 kΩcm para 21 dias de idade das amostras. Constatou-se que há diferença estatística para todos os traços;

IV. Diferença Mínima Significativa DMS = 1,20 kΩcm para 28 dias de idade das amostras. Constatou-se que há diferença estatística para todos os traços;

V. Diferença Mínima Significativa DMS = 1,32 kΩcm para 56 dias de idade das amostras. Constatou-se que há diferença estatística para todos os traços;

VI. Diferença Mínima Significativa DMS = 2,99 kΩcm para 91 dias de idade das amostras. Constatou-se que não há diferença estatística entre os traços TCPIV e TSCA10.

Na Tabela 13, podem-se notar as diferenças percentuais dos traços ensaiados em relação ao traço de referência para a resistividade elétrica superficial. O maior decréscimo percentual foi registrado para o TCPII-F, 48,20%, aos 91 dias. O maior acréscimo percentual corresponde ao TSCA20, 162,54%, aos 91 dias, também.

Tabela 13 - DIFERENÇAS PERCENTUAIS DOS TRAÇOS ENSAIADOS À RES EM RELAÇÃO AO TRAÇO DE REFERÊNCIA (TCPV)

	07 dias	14 dias	21 dias	28 dias	56 dias	91 dias
TCPV	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.
TCPIV	-34,19	-26,45	-8,97	-9,00	25,19	46,47
TSCA20	-21,37	5,04	45,51	44,59	129,76	162,54
TCPII-F	-31,62	-28,10	-40,96	-39,41	-44,48	-48,20
TSCA10	10,26	15,12	8,97	16,41	31,76	44,57

Fonte: a Autora (2023)

Os valores altos de RES para os traços com substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz podem ser justificados devido à alta reatividade, assim como o descrito no trabalho de Araújo *et al*. (2022); e, também, devido ao efeito filer, já que com a presença da SCA no traço, há mais grãos por grama de material. O efeito obtido relaciona-se ao refinamento e melhor distribuição do tamanho dos poros na microestrutura da pasta, que contribuiu para torná-la mais densa (efeito físico) e, consequentemente, dificultar a passagem de corrente elétrica (WOSNIACK *et al*, 2021).

Wosniack *et al*. (2021) ainda descrevem a redução da portlandita (efeito químico), consumida na reação pozolânica, tendendo a reduzir a condutividade da água dentro dos poros do concreto; tais argumentos indicam que a capacidade de fixar cal das adições pozolânicas é um fator de influência na resistividade elétrica do concreto.

Os resultados de Wosniack *et al*. (2021) mostraram que as adições pozolânicas influenciaram os valores de resistividade elétrica obtidos. As amostras contendo

adições mais reativas atingiram resistividades elétricas superiores às do traço de referência, assim como o verificado neste estudo. Aos 28 dias, os traços que continham substituição parcial de 10% do cimento Portland por sílica ativa e sílica de casca de arroz desenvolveram maior resistividade elétrica, sendo categorizados na faixa negligenciável de risco de corrosão de acordo com o CEB 192 (1989). O traço com sílica de casca de arroz apresentou aumento de 139% na resistividade elétrica em comparação com o traço de referência aos 28 dias.

Medeiros-Junior *et al*. (2014) observaram acréscimo da RES com o tempo de ensaio para as amostras estudadas, indicando tendência de crescimento com o tempo devido à hidratação do cimento e endurecimento progressivo do concreto, o que também foi constatado por Andrade e D'Andrea (2011). As amostras com CP IV 32, por exemplo, obtiveram o segundo melhor desempenho em termos de RES quando comparadas com CPV ARI, CPIII RS 40 e CPII-F 32 (sendo o melhor resultado para o CPIII RS 40), comportamento explicado pela quantidade significativa de adições pozolânicas na composição do cimento. Esta pesquisa corrobora com o que os supramencionados autores descrevem.

Araújo *et al*. (2022) e Hoppe Filho *et al*. (2015) obtiveram comportamento similar, de aumento da RES com uso de materiais cimentícios suplementares, validando o resultado obtido neste trabalho.

Resultados de Medeiros-Junior *et al*. (2019) mostraram que concretos com maior teor de pozolana apresentam maior resistividade e absorção por capilaridade para relação água/cimento menor que 0,60, que é o caso deste trabalho (a/c = 0,53), comportamento atribuído ao diâmetro dos poros.

4.6. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Foi realizado o teste acelerado de migração de cloretos, de modo que o arranjo do ensaio envolveu o agrupamento de amostras considerando quatro ou oito fatias de dois cilindros de concreto (sendo sempre duas de cada corpo de prova).

O conjunto foi submetido a uma tensão de 60 V, durante 6 horas, com leituras de corrente registradas a cada 30 minutos. Este ensaio foi realizado aos 28 e 91 dias de idade de cura submersa das amostras.

Uma menor carga obtida ao final do ensaio indica melhor resistência à penetração dos íons cloreto e, então, menor permeabilidade (YILDIRIM *et al*., 2011).

A partir da análise de variância (ANOVA), pode-se constatar que o efeito da idade (hidratação do cimento) foi significativo na questão de diminuição da carga passante. A partir do Teste de Tukey, pode ser constatado que, aos 28 dias, entre o traço de referência (TCPV) e o traço TCPII-F há diferença estatística. Para os 91 dias de idade das amostras, verifica-se que só não há diferença estatística entre o traço de referência e o traço TCPIV, enquanto que, para todos os outros pares, há diferença.

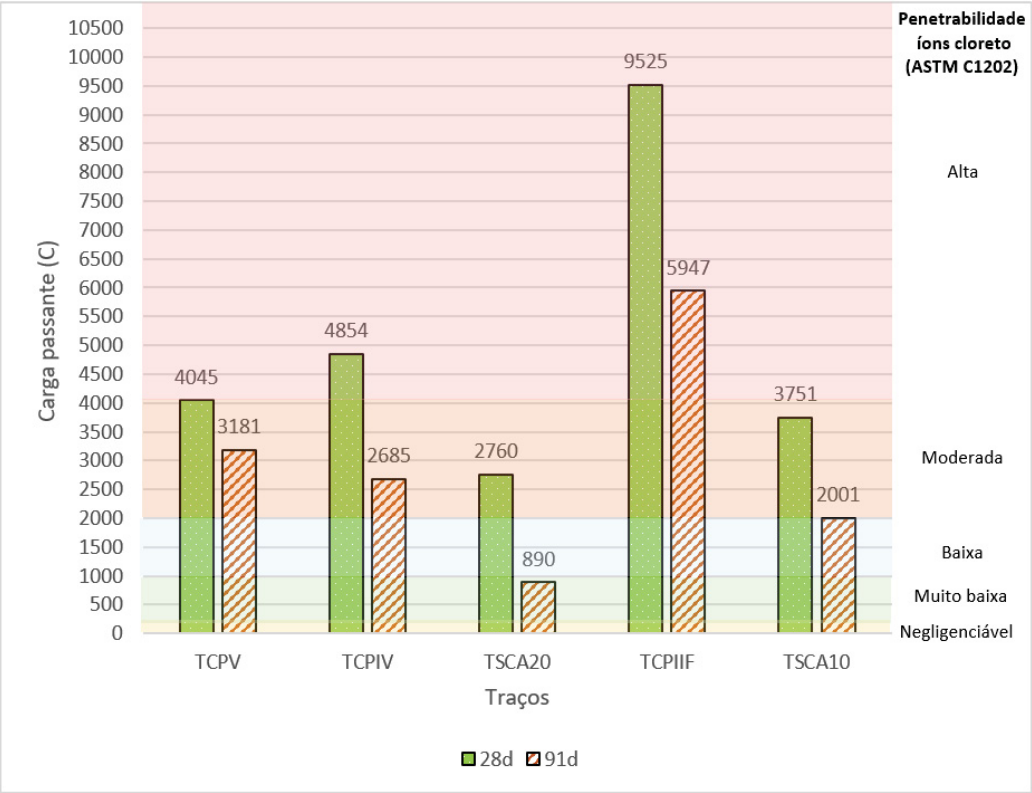
Os resultados obtidos por amostra (duas fatias cada) são considerados coerentes, por não extrapolarem o coeficiente de variação admitido pela referência normativa (12,3%).

Aos 28 dias, o maior resultado da carga passante pode ser verificado para o traço TCPII-F, com 9525C, seguido pelo traço TCPIV (4854C), TCPV (4045C), TSCA10 (3751C) e TSCA20 (2760C). Percebe-se um aumento de 135,48% do traço de referência para o traço TCPII-F, enquanto que para o traço TCPIV, houve aumento de 20%, enquanto que para o traço TSCA10, diminuição de 7,27%, e para o TSCA20, diminuição de 31,77%.

Aos 91 dias, a maior de carga passante foi correspondente ao traço TCPII-F, 5947C, 86,95% de aumento em relação ao traço de referência. Em seguida, o maior traço com carga passante foi o de referência. O traço TSCA10 apresentou 37% de diminuição na carga passante em relação ao de referência (TCPV). Por fim, TSCA20 com diminuição de 72%.

A Figura 45 mostra os resultados de carga passante total para cada uma das proporções de mistura deste experimento.

Figura 45 - COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS DE PASSAGEM DE CARGA PASSANTE PARA OS CINCO TRAÇOS - ENSAIOS AOS 28 E 91 DIAS



Fonte: a Autora (2023)

A porosidade no estudo de Hoppe Filho *et al*. (2015), para concretos contendo cinza volante, aumentou em relação ao concreto de referência. Entretanto, houve uma redução do tamanho dos poros, e alteração das propriedades de transporte dos íons cloreto, reduzindo a carga passante e o coeficiente de difusão de cloretos.

Medeiros *et al*. (2011) estudaram duas adições pozolânicas com 10% de substituição ao cimento Porland, sílica ativa e metacaulim, pozolanas de alta reatividade como a sílica de casca de arroz. Os resultados obtidos no ensaio rápido de penetração de cloretos indicaram redução significativa da carga passante em relação ao concreto de referência. O traço com metacaulim apresentou redução da carga passante entre 72,1% e 84,3%, enquanto que a sílica ativa apresentou redução entre 85,3% e 90,2%. Os autores concluem que o metacaulim tem um potencial de melhora das propriedades de transporte, similar à sílica ativa. Essas adições foram consideradas como eficazes para fabricação de concreto de alta durabilidade. O mesmo comportamento foi identificado nesta pesquisa.

Rodrigues (2023) observou tendência de aumento da resistência à penetração de cloretos com o aumento da idade do concreto, assim como houve para todos os concretos deste trabalho.

Hwang e Chandra (2002) afirmam que a cinza de casca de arroz refina a estrutura dos poros reduzindo a permeabilidade do concreto aos íons cloreto; descrevem que a permeabilidade foi consideravelmente reduzida após 28 dias de cura para as pastas de cimento que continham substituição parcial de cimento Portland por 10, 20 ou 30% de casca de arroz.

4.7. PERMEABILIDADE AO AR

Percebeu-se que o coeficiente kT teve variação em todas as idades, com decréscimo dos 28 para os 91 dias nos traços TCPV, TCPIV e TSCA10, acréscimo para os traços TSCA20 e TCPII-F.

A ANOVA permitiu discernir que há diferença significativa entre os resultados obtidos para os coeficientes. Percebeu-se que há diferença estatística entre os traços TCPV e TCPIV, TCPV e TSCA10, TCPV e TSCA20, TCPIV e TSCA20, TCPII-F e TSCA20, TSCA10 e TSCA20 para as aferições de 28 dias.

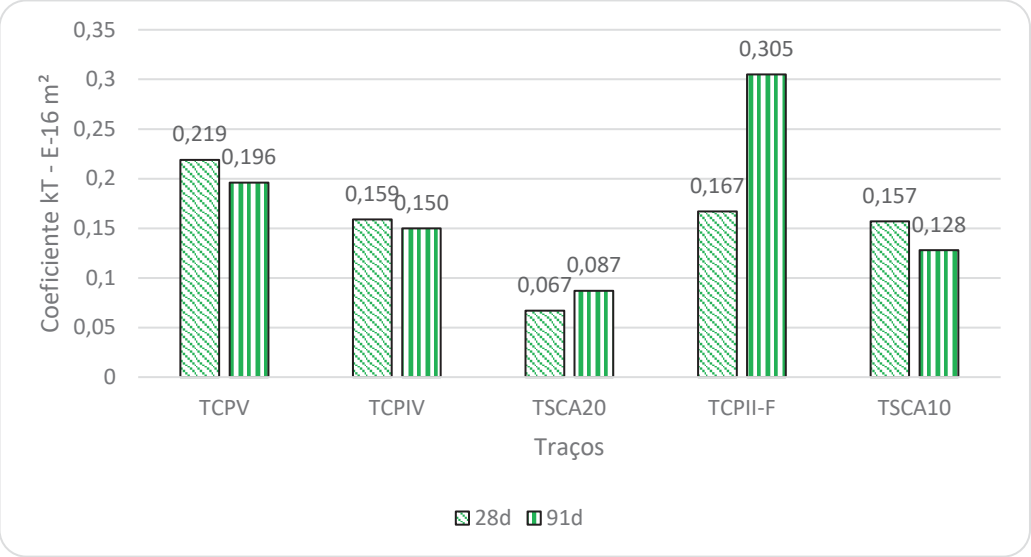
Para os 91 dias, só não existe diferença estatística entre os resultados TCPIV e TSCA10, TSCA10 e TSCA20.

Para os 28 dias, o maior coeficiente kT foi obtido pelo traço TCPV, com 0,219 E-16/m², seguido pelo traço TCPII-F (diminuição de 23,74% em relação ao traço de referência), TCPIV (diminuição de 27,40%), TSCA10 (diminuição de 28,31%) e TSCA20 (diminuição de 69,41%).

Aos 91 dias, o maior coeficiente foi obtido para o traço TCPII-F (aumento de 55,61% em relação ao traço de referência), seguido pelo traço TCPV (referência), TCPIV (diminuição de 23,47%), TSCA10 (diminuição de 34,69%) e TSCA20 (diminuição de 55,61%).

A maior diferença entre os coeficientes obtidos para as idades de 28 e 91 dias foi registrada para o traço TCPII-F que, ao contrário do que se esperava, apresentou aumento do coeficiente kT em 82,63%, seguido pelo traço TSCA20, com aumento de 29,85%, TSCA10, aumento 18,47%, TCPV, diminuição 10,50% e TCPIV, 5,66%. A Figura 46 apresenta os resultados obtidos para o coeficiente kT aos 28 e 91 dias de idade das amostras.

Figura 46 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE - KT - PARA OS TRAÇOS AOS 28 E 91 DIAS



Fonte: a Autora (2023)

A Tabela 14 apresenta a classificação dada ao coeficiente kT quanto à qualidade do concreto de acordo com as aferições.

Tabela 14 - COEFICIENTE kT – QUALIDADE DA COBERTURA DO CONCRETO – PERMEABILIDADE AO AR- MÉTODO TORRENT

	Classificação da qualidade da cobertura do concreto	**kT medido (E-16 m²)**
1	Muito boa	kT < 0,01
2	Boa	0,01 < kT < 0,1
3	Normal	0,1 < kT < 1,0
4	Ruim	1,0 < kT < 10
5	Muito ruim	kT > 10

Fonte: a Autora (2023)

As medidas de permeabilidade ao ar podem ser influenciadas por variáveis que afetam características da estrutura de poros, a exemplo de uma possível descontinuidade, presença de água ou umidade, surgimento de produtos de reações, fissuras, composição do concreto, materiais utilizados na dosagem, temperatura (JACOBS; HUNKELER, 2016; SENTONE, 2011)

O uso de adições (pozolanas, cinzas volantes, cal) também é responsável por alterações na permeabilidade dos concretos (SENTONE, 2011). A medida da permeabilidade ao ar é uma importante ferramenta para determinação das características e condições de microestrutura dos materiais, desde a sua concepção até ao longo de todo seu período de utilização (SENTONE, 2011).

A permeabilidade ao ar do concreto é influenciada pela composição do traço, conteúdo da mistura (materiais usados), temperatura e demais condições do recobrimento (JACOBS; HUNKELER; 2006).

4.8. CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS

Nesta seção, foi desenvolvido um estudo de correlação dos resultados dos parâmetros mensurados. Os gráficos correlacionam, aos pares, os parâmetros estudados. Segundo Shimakura (2002), pode-se considerar o parâmetro R^2 de acordo com a Tabela 15.

Tabela 15 - INTERPRETAÇÃO DOS VALORES DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO R

Coeficiente de correlação	Interpretação da correlação
0,00 a 0,19	Bem fraca
0,20 a 0,39	Fraca
0,40 a 0,69	Moderada
0,70 a 0,89	Forte
0,90 a 1,00	Muito forte

Fonte: Shimakura (2002)

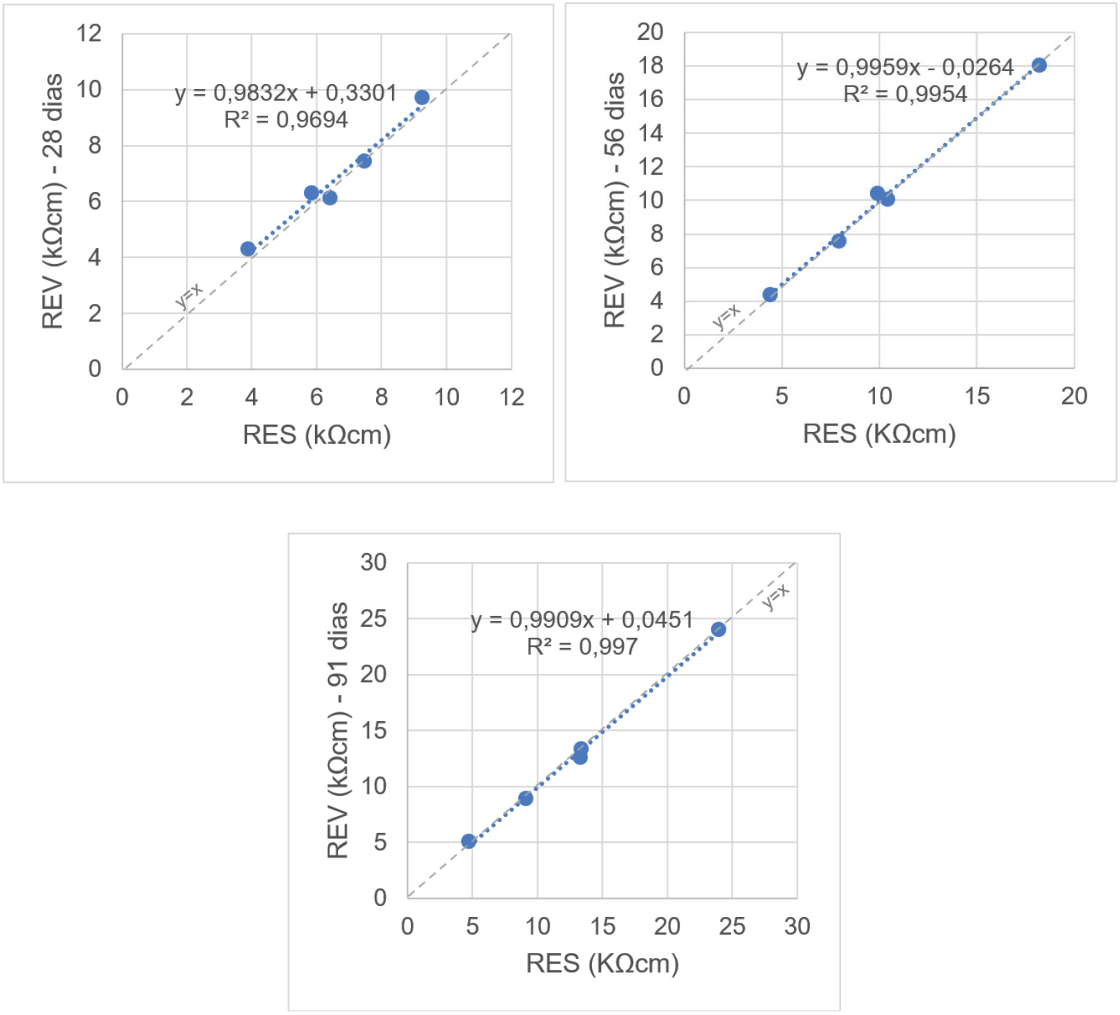
Nesta seção, portanto, as correlações serão classificadas de acordo com o referido critério, como no trabalho de Rodrigues (2023), que também balizou resultados com esse embasamento.

4.8.1. Resistividade elétrica superficial (RES) x resistividade elétrica volumétrica (REV)

A Figura 47 apresenta o gráfico que relaciona resistividade elétrica superficial e resistividade elétrica volumétrica aos 28 dias, com R^2 equivalente a 0,9694, aos 56 dias com R^2 de 0,9954 e aos 91 dias, com R^2 equivalente a 0,9970, correlações consideradas muito fortes. A reta tracejada (y=x) indica como seria a disposição dos pontos, caso os dados de REV e RES fossem idênticos.

Cada ponto nos gráficos indica à média dos valores médios de quatro corpos de prova de cada amostra, nos casos em que não houve eliminação de dados espúrios.

Figura 47 - CORRELAÇÃO ENTRE RES X REV – 28, 56 E 91 DIAS



Fonte: a Autora (2023)

A Figura 47 mostra a correlação entre a REV e a RES, duas grandezas que são iguais, porém com métodos de medição diferentes. Neste caso, o R^2 foi de 0,9694, 0,9954 e 0,9970 que representa uma correlação quase perfeita por ter proximidade com o valor máximo possível para o R^2 que é 1. Logo, pode-se depreender da interpretação do coeficiente de correlação (R) apresentado por Shimakura (2002), existe uma correlação muito forte entre os valores aferidos para RES e REV.

Os valores encontrados para a correlação aproximam-se do obtido por Farias (2020), que descreveu R^2 de 0,96, com relação linear entre o método direto de aferição (REV) e o superficial (RES).

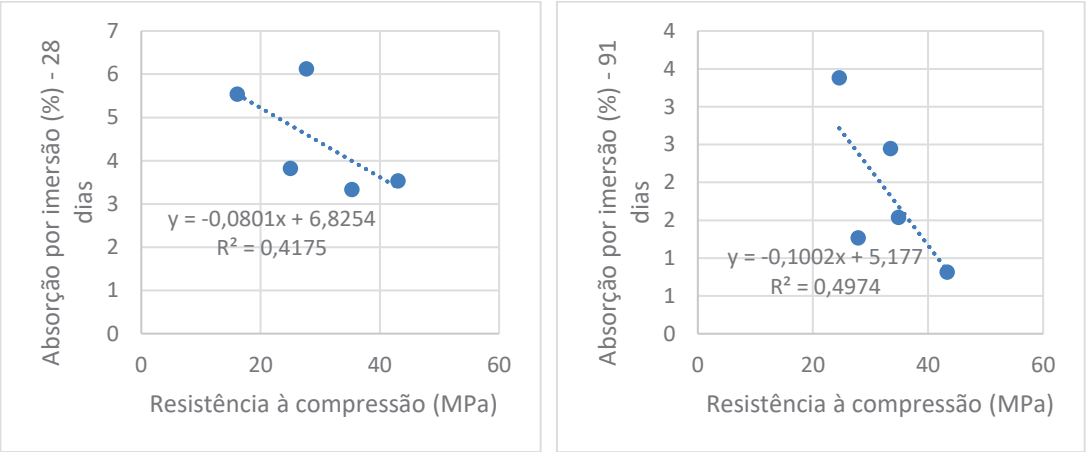
Rodrigues (2023) definiu como uma boa correlação a existente entre REV e RES, confirmada pelos R^2 obtidos, assim como Azzi e Costa (2017) e Almarshoud *et al*. (2021), corroborando com o identificado nesta pesquisa.

Wosniack *et al*. (2020) relacionaram a resistividade elétrica obtida pelo método dos quatro eletrodos e a resistividade elétrica pelo ensaio de migração de cloretos, obtendo, também, uma correlação linear, com R² equivalente de 0,9319, já Spragg (2011), ao relacionar RES e REV, obteve R² de 0,998, enquanto que Ghosh e Tran (2015) obtiveram coeficiente R² variando entre 0,82 e 0,95. Sengul e Gjorv (2019), R² de 0,99. Os resultados obtidos por esses autores ratificam o que foi encontrado nesta pesquisa.

4.8.2. Absorção de água por imersão x resistência à compressão

A Figura 48 apresenta o gráfico que relaciona absorção por imersão e resistência à compressão aos 28 dias, com R² equivalente a 0,4175, e aos 91 dias, com R² equivalente a 0,4974.

Figura 48 - CORRELAÇÃO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ABSORÇÃO POR IMERSÃO - 28 E 91 DIAS



Fonte: a Autora (2023)

Observa-se que não há uma relação estabelecida por um R² alto entre o ensaio de absorção por capilaridade e absorção por imersão em relação à resistência à compressão. Isso também foi percebido no estudo de Real (2015), quando a autora descreveu que a absorção por capilaridade não reduz conforme a resistência à compressão aumenta; não sendo suficiente, portanto, especificar um concreto mais resistente visando reduzir o ingresso de água em uma estrutura de concreto.

Medeiros-Junior *et al*. (2019) também identificaram uma relação inversa entre a absorção de água por imersão e resistência à compressão, validando o resultado aqui obtido.

4.8.3. Absorção de água por capilaridade x resistência à compressão

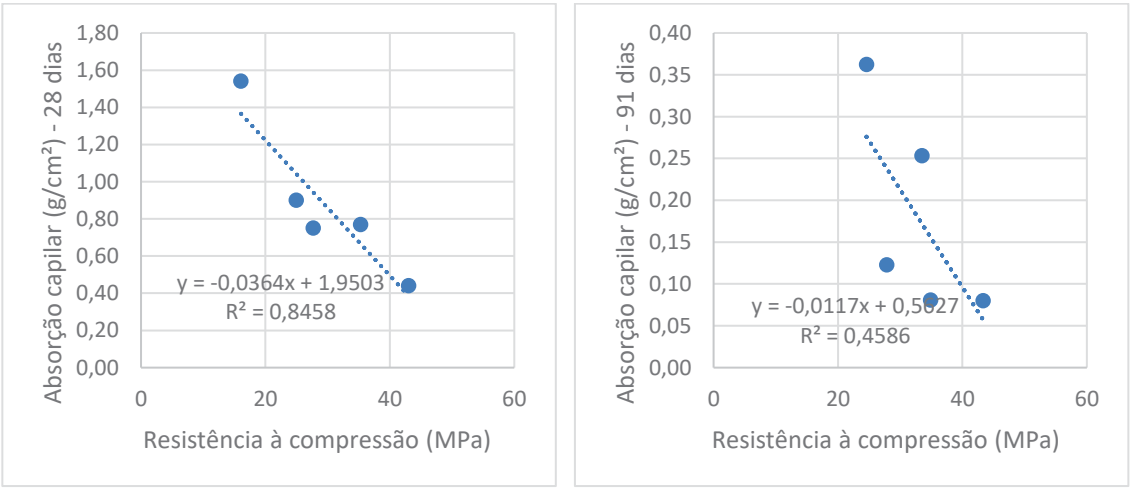
A Figura 49 apresenta o gráfico que relaciona absorção por capilaridade e resistência à compressão aos 28 e 91 dias.

O R² encontrado para 28 dias corresponde a 0,8458, considerado (pelo critério de Shimakura) como forte.

Medeiros-Junior *et al*. (2019) encontraram um R² considerado como muito forte entre a absorção capilar e a resistência à compressão, 0,9908, para a mesma idade de amostras testadas com pozolanas, corroborando com a tendência de resultado encontrada para esta pesquisa.

O R² encontrado para 91 dias corresponde a 0,4586, considerado (pelo critério de Shimakura) como moderado.

Figura 49 - CORRELAÇÃO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE - 28 E 91 DIAS

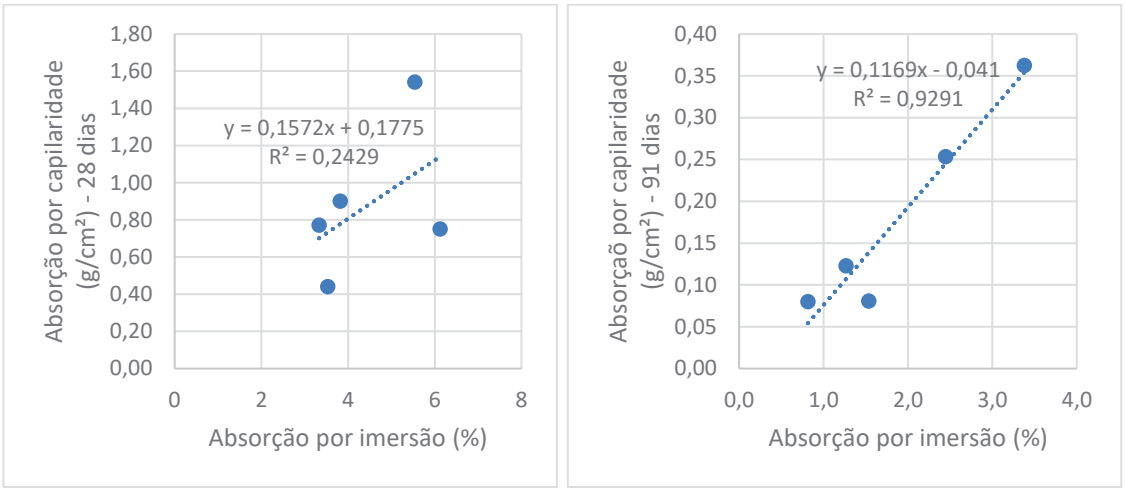


Fonte: a Autora (2023)

4.8.4. Absorção de água por imersão x absorção de água por capilaridade

A Figura 50 apresenta o gráfico que relaciona absorção de água por imersão e capilaridade aos 28 dias, com R² equivalente a 0,2429, e aos 91 dias, com R² equivalente a 0,9291.

Figura 50 - CORRELAÇÃO – ABSORÇÃO POR IMERSÃO E POR CAPILARIDADE- 28 E 91 DIAS



Fonte: a Autora (2023)

Aos 28 dias, o R^2 encontrado, que corresponde a 0,2429, é considerado como uma fraca correlação. Porém, aos 91 dias, o R^2 encontrado foi de 0,9291, considerado como muito forte.

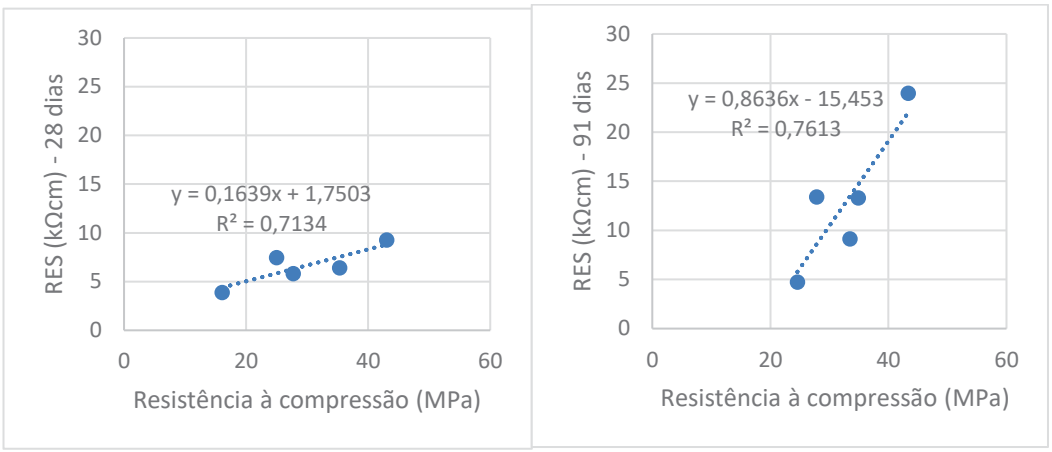
Rivarola (2023) testou a correlação entre absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade em idade diferente da proposta por este estudo, aos 154 dias de idade das amostras. Obteve R^2 de 0,266, identificando pouca relação entre esses dados. Real (2015) também obteve baixa correlação entre os resultados de imersão e capilaridade.

No entanto, Medeiros-Junior *et al*. (2019) obtiveram correlação com R^2 acima de 0,9, que foi justificada pela alta dependência entre as propriedades, salientando-se a influência na absorção e percolação de água na microestrutura do concreto.

4.8.5. Resistividade elétrica superficial x resistência à compressão

A Figura 51 mostra a correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica superficial.

Figura 51 - CORRELAÇÃO ENTRE RES X RC – 28 E 91 DIAS



Fonte: a Autora (2023)

Medeiros-Junior *et al*. (2014) mostraram que os tipos de cimento têm influência direta nos ensaios de resistividade elétrica e resistência à compressão. No estudo desses autores, houve redução da resistência à compressão quando comparada uma série de referência com cimentos com adição de escória de alto forno e pozolanas, porém notou-se uma elevação da RES com a presença das adições nas proporções de mistura.

Ainda, Medeiros-Junior *et al*. (2014) encontraram uma correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica superficial que definiram como boa, R^2 variando de 0,823 a 0,999, alterada conforme tipo de cimento e idade do ensaio. Andrade e D'Andrea (2011) afirmam que, quanto maior a resistividade, menor a porosidade e maior a resistência mecânica do concreto (configurando as grandezas aqui envolvidas como diretamente proporcionais).

Medeiros-Junior *et al.* (2019) identificaram que resistência à compressão e resistividade elétrica são parâmetros que possuem correlação direta, também (assim como o verificado neste trabalho e por Andrade e D'Andrea), e atribuem o fato à clara influência da porosidade sobre ambas as propriedades. Afirmam que existe uma relação de dependência entre resistência à compressão e resistividade elétrica, que foi comprovada por um R^2 alto (0,98).

A correlação obtida na presente pesquisa, que se refere a um R^2 de 0,7134 aos 28 dias, e R^2 de 0,7613 aos 91 dias, de acordo com o critério proposto por Shimakura (2002), pode ser considerada como forte.

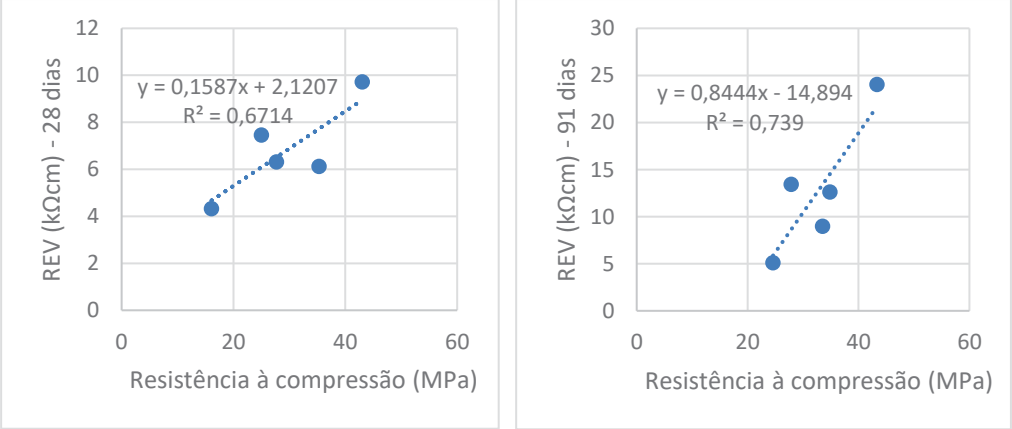
4.8.6. Resistividade elétrica volumétrica x resistência à compressão

A correlação entre os resultados médios da RC e da REV entre todas as amostras e por traço, é demonstrada na Figura 52. Cada ponto no gráfico corresponde a uma média de resistência à compressão, e uma média de REV obtidas de seis corpos de prova.

Assim como o observado por Rivarola (2023), RC e REV crescem juntas durante o experimento, o que também foi percebido por Medeiros Junior *et al*. (2014), Medeiros-Junior (2019) e Ramezanianpour *et al*. (2011), estes últimos identificaram R^2 de 0,4131 entre a resistência à compressão e a resistividade elétrica, analisando 57 traços de concreto, em que apenas um tipo de cimento foi utilizado.

Rivarola (2023) encontrou coeficiente de determinação R^2 igual a 0,84. Aos 28 dias, a correlação encontrada por esta pesquisa foi positiva e equivalente a um R^2 de 0,6714, enquanto que, aos 91 dias, 0,739. Isso significa que, aos 28 dias, quando a resistência à compressão aumenta, a resistividade elétrica volumétrica também cresce.

Figura 52 - CORRELAÇÃO ENTRE REV X RC – 28 DIAS



Fonte: a Autora (2023)

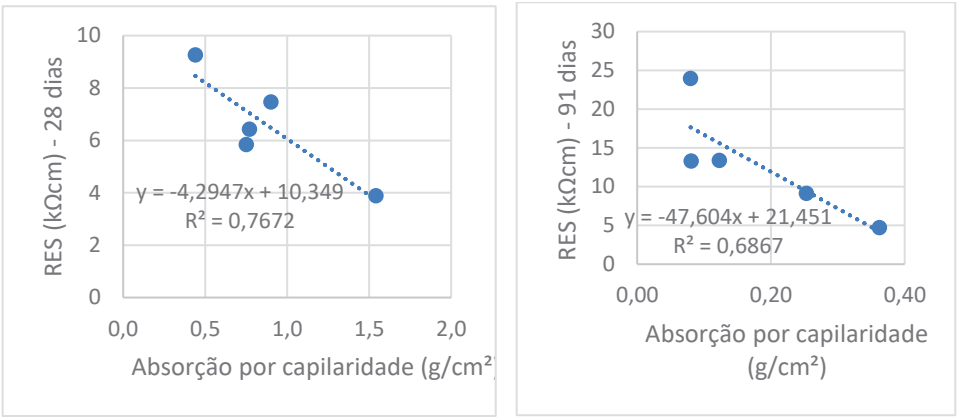
4.8.7. Resistividade elétrica superficial (RES) x absorção de água por capilaridade

A Figura 53 apresenta a correlação entre a resistividade elétrica superficial e absorção de água por capilaridade.

O coeficiente R^2 encontrado para a correlação entre a resistividade elétrica superficial e a absorção por capilaridade foi de 0,7672 (classificado como forte correlação) para os resultados aos 28 dias e 0,6867 (classificado como moderada correlação), para os resultados aos 91 dias.

Ramezanianpour *et al*. (2011) buscaram a correlação entre propriedades também, identificando uma forte correlação entre resistividade elétrica e permeabilidade nos concretos.

Figura 53 - CORRELAÇÃO ENTRE RES X ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE



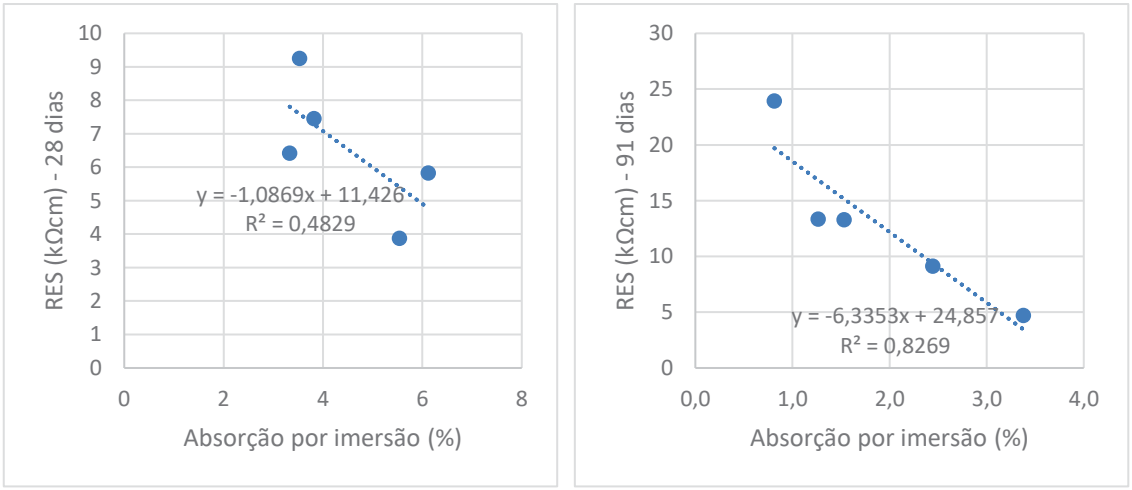
Fonte: a Autora (2023)

Medeiros-Junior *et al*. (2019) encontraram como resultado, um gráfico decrescente (indicando relação inversa entre os parâmetros, assim como no presente trabalho), com R² considerado forte e muito forte; enquanto o que foi identificado por esta pesquisa foi considerado moderado e forte.

4.8.8. Resistividade elétrica superficial (RES) x absorção de água por imersão

A Figura 54 apresenta a correlação entre a resistividade elétrica superficial e absorção de água por imersão.

Figura 54 - CORRELAÇÃO ENTRE RES X ABSORÇÃO POR IMERSÃO



Fonte: a Autora (2023)

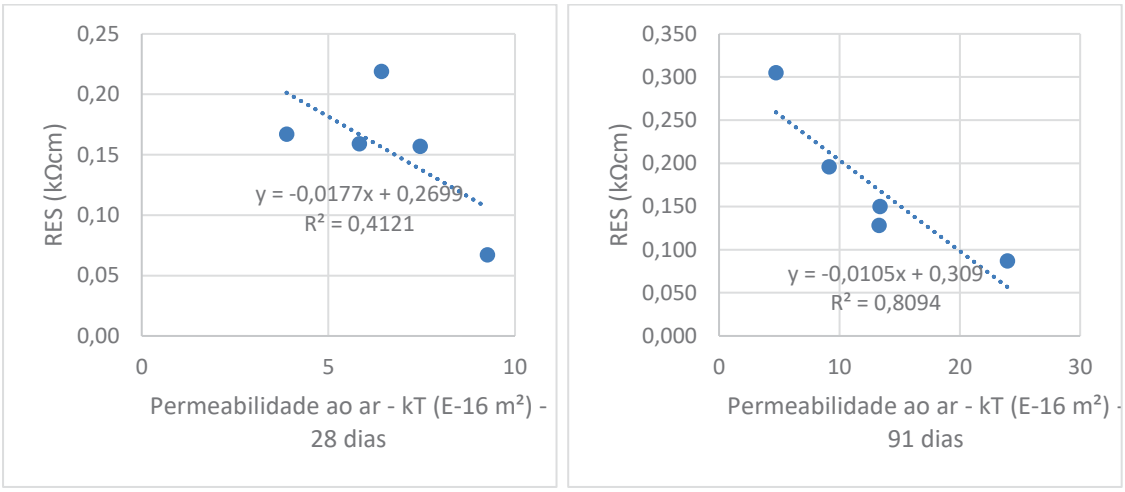
Segundo o critério de Shimakura (2002) o R² obtido aos 28 dias é considerado moderado e, aos 91 dias, considerado como forte.

Medeiros-Junior *et al*. (2019) descreveram a correlação por eles encontrada entre a resistividade e absorção por imersão como inversa. Explicam que a água absorvida na microestrutura do concreto aumenta sua condutividade elétrica e, consequentemente, reduz a resistividade elétrica.

4.8.9. Resistividade elétrica superficial (RES) x permeabilidade ao ar

A Figura 55 indica a correlação entre a permeabilidade ao ar e resistividade elétrica superficial.

Figura 55 - CORRELAÇÃO ENTRE PERMEABILIDADE AO AR X RES



Fonte: a Autora (2023)

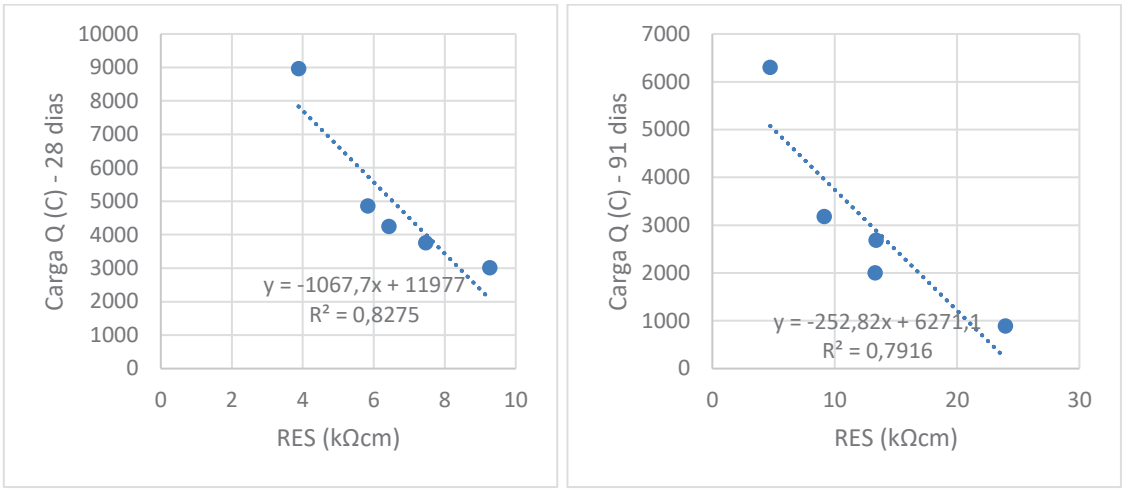
Ramezanianpour *et al*. (2011) identificaram R² de 0,8268 para a correlação entre resistividade elétrica superficial e a penetração de água (relacionada à permeabilidade), resultado próximo do R² obtido pela correlação entre os dados de 91 dias de idade das amostras (0,8094, correlação forte).

Aos 28 dias de idade das amostras, a correlação foi considerada como moderada pelo critério de Shimakura (2002).

4.8.10. Resistividade elétrica superficial (RES) x resistência à penetração de cloretos

A Figura 56 indica a correlação entre a resistividade elétrica superficial e resistência à penetração de cloretos.

Figura 56 - CORRELAÇÃO ENTRE RES X RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS



Fonte: a Autora (2023)

Pode-se verificar, para os 28 dias, R^2 equivalente a 0,8275 e, para os 91 dias, R^2 de 0,7916, classificando-se as correlações como fortes, segundo o critério de Shimakura (2002).

A resistividade elétrica do concreto representa íons em movimento (a exemplo dos íons cloreto) na solução dos poros; sendo assim, a relação entre a resistividade elétrica e penetração de íons cloreto no concreto é razoável (RAMEZANIANPOUR *et al.*, 2011).

Se a resistividade elétrica for alta, então o movimento dos íons cloreto no concreto será lento e consequentemente a taxa de corrosão será diminuída de forma razoável, levando os elementos de concreto a serem mais duráveis e com um ciclo de vida mais longo (RAMEZANIANPOUR *et al.*, 2011). Os resultados de Polder (2000) mostram que existe uma relação linear entre a resistividade elétrica e a probabilidade de corrosão no concreto.

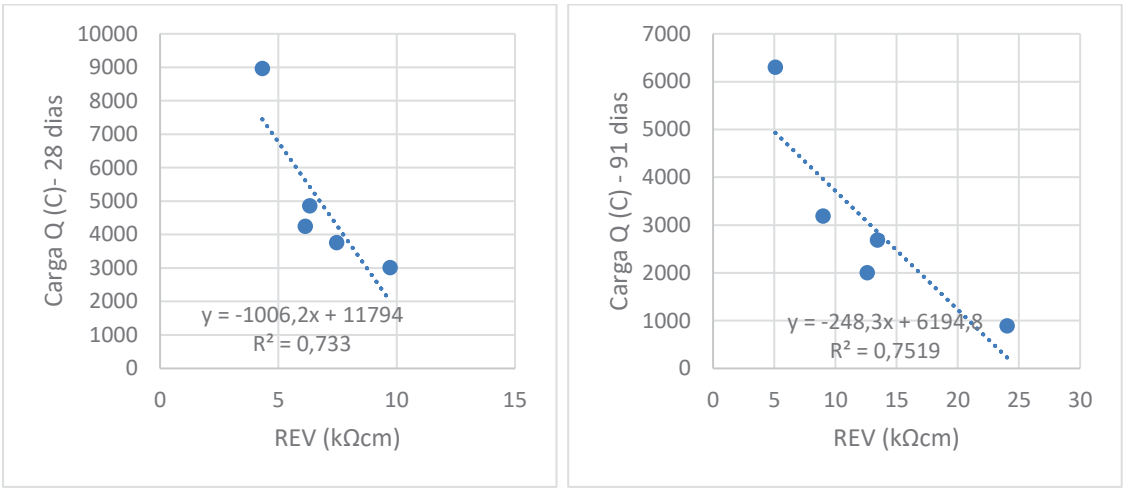
Ramezanianpour *et al*. (2011) descreve que a relação entre os dois testes deve ser linear, o que foi obtido por esta pesquisa (a melhor correlação pode ser estabelecida por uma reta nas duas idades consideradas 28 e 91 dias. Esses autores identificaram um R^2 de 0,898 entre a resistividade elétrica superficial e o RCPT (*Rapid Chloride Penetration Test*).

Yildirim *et al*. (2011) obtiveram uma forte correlação entre a resistividade elétrica e os resultados do teste rápido de permeabilidade ao íon cloreto.

4.8.11. Resistência à penetração de cloretos X REV

A Figura 57 mostra que se obteve uma correlação inversa entre a resistividade elétrica volumétrica e a carga passante, com R² equivalente a 0,733 para a idade de 28 dias e R² de 0,7519 para a idade de 91 dias, ambos considerados como fortes.

Figura 57 - CORRELAÇÃO ENTRE CARGA PASSANTE E REV – 28 E 91 DIAS



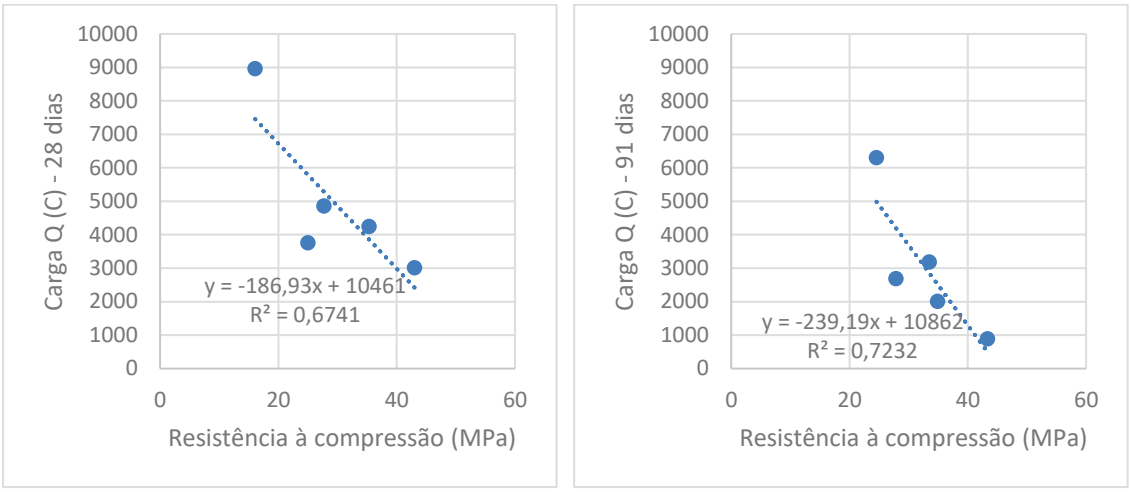
Fonte: a Autora (2023)

Enquanto há aumento da REV, a carga passante diminui. Rivarola (2023) obteve comportamento similar, correlação inversa com R² caracterizada como muito forte; o autor discute que a composição de aglomerantes, aparentemente, não influencia na correlação apresentada.

4.8.12. Resistência à compressão x resistência à penetração de cloretos

A Figura 58 apresenta a correlação entre a resistência à compressão e a carga passante no ensaio de resistência à penetração de cloretos.

Figura 58 - RC X CARGA TOTAL PASSANTE – 28 E 91 DIAS



Fonte: a Autora (2023)

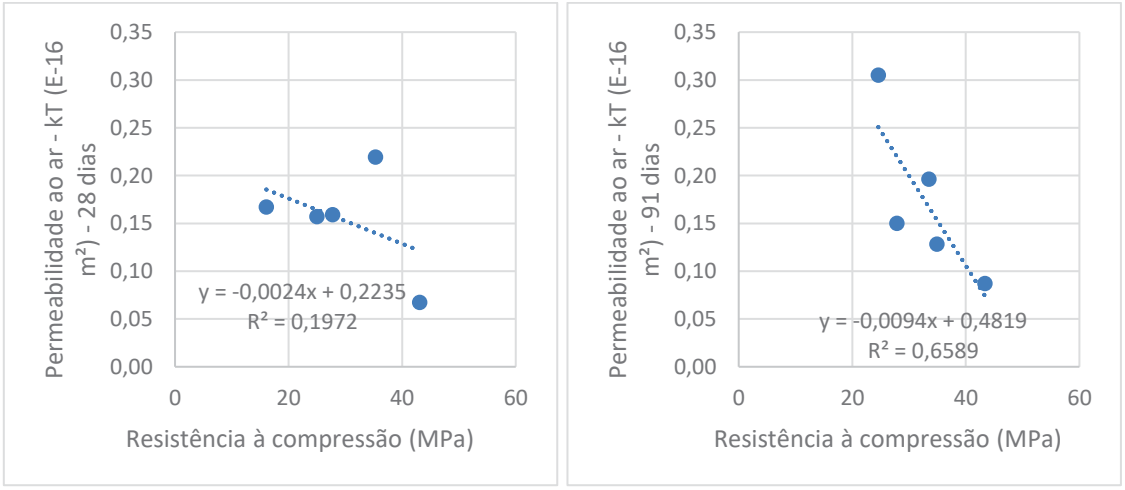
Pelos gráficos, a relação entre a carga passante e resistência à compressão é inversa, ou seja, sugere que quanto maior a resistência à compressão, menor é a penetração de cloretos.

O coeficiente R² obtido para a idade de 28 dias das amostras foi de 0,6741, enquanto que, para a idade de 91 dias, foi equivalente a 0,7232, podendo ser classificado como moderado e forte, respectivamente.

4.8.13. Resistência à compressão x permeabilidade ao ar

A Figura 59 mostra a correlação entre a permeabilidade ao ar e resistência à compressão, aos 28 e 91 dias.

Figura 59 - RC X PERMEABILIDADE AO AR – 28 E 91 DIAS



Fonte: a Autora (2023)

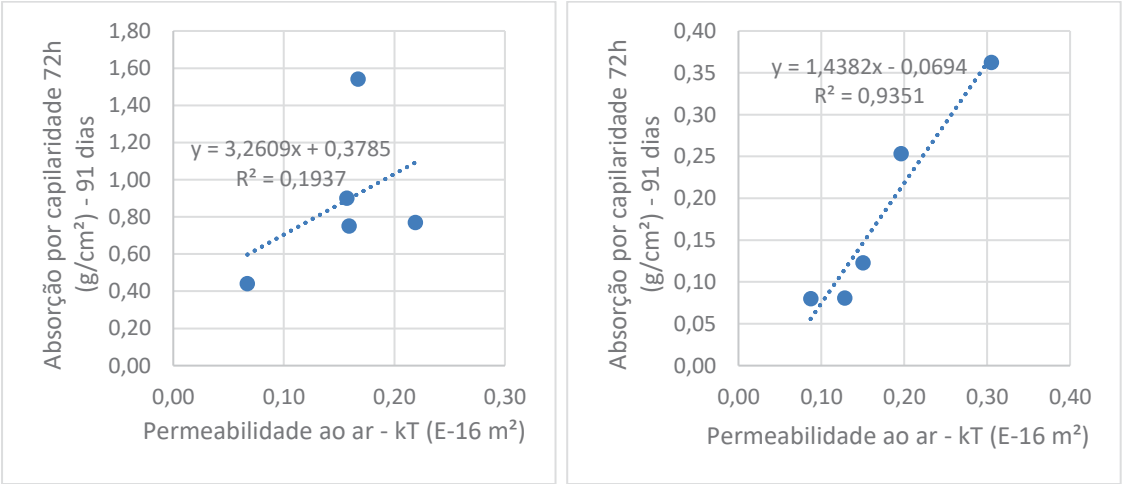
A correlação encontrada entre os parâmetros aos 28 dias, equivale a um R² de 0,1972, enquanto que a correlação encontrada para os dados referentes a 91 dias, equivale a um R² de 0,6589. A classificação desses coeficientes pode ser dita como bem fraca e moderada, respectivamente.

Jacobs e Hunkeler (2006) encontraram, assim como nesta pesquisa, uma correlação descrita por retas decrescentes, o que indica uma relação inversa entre as grandezas envolvidas.

4.8.14. Absorção de água por capilaridade x permeabilidade ao ar

A Figura 60 apresenta a correlação entre permeabilidade ao ar e absorção de água por capilaridade.

Figura 60 - CORRELAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO CAPILA R E PERMEABILIDADE AO AR- 28 E 91 DIAS



Fonte: a Autora (2023)

Avalia-se um coeficiente R² de 0,1937 aos 28 dias e R² de 0,9351 aos 91 dias no gráfico, classificados pelo critério de Shimakura (2002) como uma correlação bem fraca e, outra, em idade posterior, muito forte.

Percebe-se uma correlação direta entre a absorção capilar e permeabilidade ao ar aos 91 dias, o que corrobora com os autores Ebensperger e Torrent (2014) quando descrevem uma tendência de maior permeabilidade à água para os testes em que o coeficiente kT também foi maior.

4.8.15. Resumo

A Tabela 16 resume o valor de R^2 encontrado para cada par analisado. R^2 é o coeficiente de determinação, equivale à proporção da variabilidade dos valores de *y* que pode ser atribuída à regressão com a variável *x* (RIBEIRO; CATEN, 2000), logo é um indicador do tipo quanto maior, melhor. Quanto mais perto de zero R^2 se aproxima, menor é a relação entre as variáveis (SOUZA, 2021).

Tabela 16 - RESUMO DAS CORRELAÇÕES ENCONTRADAS

Correlação	R^2 28 dias	R^2 91 dias
Resistência à compressão X REV	0,6714	0,7390
Resistência à compressão X RES	0,7134	0,7613
REV X RES	0,9694	0,997
Absorção imersão x absorção capilar	0,2429	0,9291
Resistência à compressão x absorção imersão	0,4175	0,4974
Resistência à compressão x absorção capilar	0,8458	0,4586
Resistência à compressão x permeabilidade ao ar	0,1972	0,6589
Carga- resistência à penetração de cloretos x resistência à compressão	0,6741	0,7232
Carga- resistência à penetração de cloretos x REV	0,733	0,7519
Absorção de água por capilaridade x permeabilidade ao ar	0,1937	0,9351
RES X absorção de água por capilaridade	0,7672	0,6867
RES x absorção de água por imersão	0,4829	0,8269
RES x permeabilidade ao ar	0,4121	0,8094
RES x carga- resistência à penetração de cloretos	0,8275	0,7916

Fonte: a Autora (2023)

Para REV e RES, aos 28 e 91 dias, obteve-se (e foi mantida) a melhor correlação dos resultados, muito próxima de 1.

4.9. AVALIAÇÃO QUANTO À ECOEFICIÊNCIA DOS CONCRETOS

4.9.1. Cálculo dos coeficientes de ecoeficiência

Os coeficientes de ecoeficiência estabelecidos (Equação 09 e Equação 10) por Damineli *et al*. (2010) são dois: *bi* - intensidade de ligante (kg/m³ /MPa); e *ci* - intensidade de CO_2 (kg/m³/MPa), conforme apresentados na revisão de literatura.

$$bi = \frac{b}{p} \tag{09}$$

$$ci = \frac{c}{p} \tag{10}$$

A eficiência do consumo de ligantes refere-se à quantidade de aglomerante requerida para atingir uma unidade de determinado indicador de desempenho, a exemplo de 1 MPa de resistência à compressão.

Assim como no trabalho de Damineli *et al*. (2010), para o cálculo de *ci* do presente trabalho foram considerados os seguintes pontos:

1) Teor das adições minerais no cimento foi considerado como a média entre o máximo e o mínimo teor permitido na NBR 16697 (ABNT, 2018).
2) Desconsideradas emissões da extração/processamento e transporte dos agregados, uma vez que o principal contribuinte das emissões de dióxido de carbono na produção do concreto é a fabricação do cimento.
3) As emissões de CO_2 derivadas da produção e transporte das matérias-primas e do concreto não foram consideradas.
4) A absorção de CO_2 durante a carbonatação do concreto também não foi considerada.
5) O teor de clínquer foi calculado subtraindo o total de mistura mineral e assumindo uma fração de sulfato de cálcio de 5%.

Damineli *et al*. (2010) citaram como média de emissão para cada tonelada de clínquer, 1 tonelada de CO_2. Contudo, o WBCSD (2018) menciona um dado correspondente a 836 kg de CO_2 emitidos por tonelada de clínquer, sendo esse o valor utilizado para o cálculo da intensidade de CO_2 neste trabalho.

Ademais, Alnahhal *et al*. (2018) apresentaram, como fator de emissão de CO_2 para a cinza de casca de arroz, 0,1032 kg de CO_2 por quilograma de material produzido.

Os resultados de *ci* são apenas um cálculo aproximado e provavelmente subestimam o real impacto ao aquecimento global. Porém, são úteis para testar o indicador e sua sensibilidade para comparar impactos de diferentes misturas, pois os erros intrínsecos são sistemáticos, e pequenos quando comparados aos montantes de CO_2 emitidos na produção do clínquer. Os teores de CO_2 foram, portanto, baseados principalmente no teor de clínquer dos cimentos, que foi calculado pela subtração do teor total de adições minerais (DAMINELI, 2013).

A seguir, serão apresentados os índices de ecoeficiência para as idades de 28 e 91 das amostras.

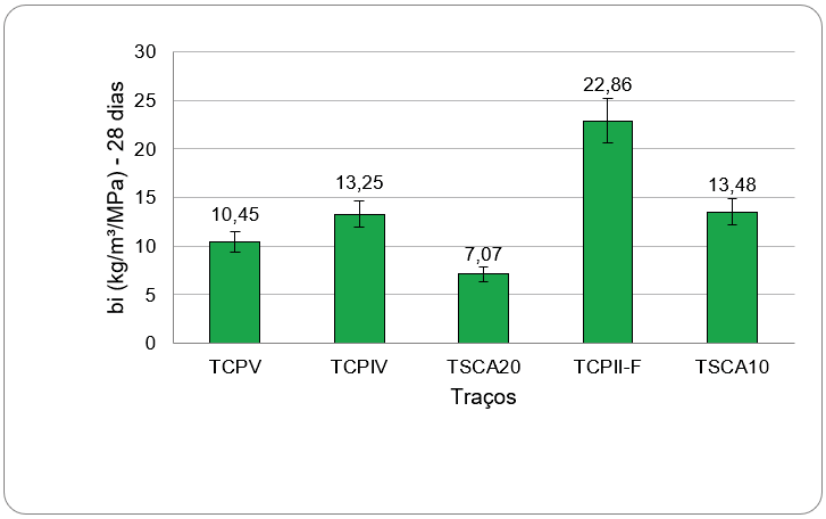
4.9.1.1. Intensidade de ligante (*bi*)

A Figura 61 apresenta a intensidade de ligante (índice bi) para a idade dos 28 dias das amostras, enquanto que a Figura 62 apresenta a intensidade de ligante (índice bi) para a idade dos 91 dias das amostras.

O maior índice bi identificado corresponde ao traço TCPII-F, 22,86 kg/m³/MPa, seguido pelo TCPIV (13,25 kg/m³/MPa), TSCA10 (13,48 kg/m³/MPa), TCPV (10,45 kg/m³/MPa) e TSCA20 (7,07 kg/m³/MPa) para os 28 dias. Para os 91 dias, o maior índice bi foi verificado para o traço TCPII-F novamente, com 14,96 kg/m³/MPa, TCPIV (13,15 kg/m³/MPa), TCPV (10,85 kg/m³/MPa), TSCA10 (9,66 kg/m³/MPa), TSCA20 (7,02 kg/m³/MPa).

Figura 61 - INTENSIDADE DE LIGANTE – 28 DIAS

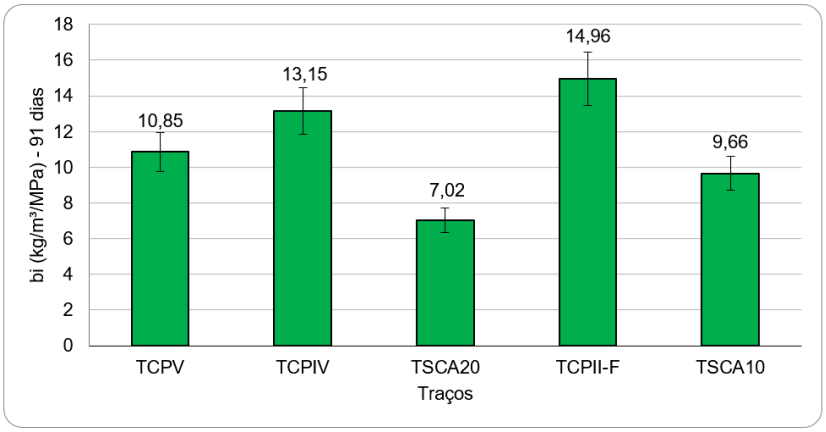
TCPV	bi	10,45	kg/m³/MPa
	b	369,00	kg/m³
	p	35,30	MPa
TCPIV	bi	13,25	kg/m³/MPa
	b	367,00	kg/m³
	p	27,70	MPa
TSCA20	bi	7,07	kg/m³/MPa
	b	304,00	kg/m³
	p	43,00	MPa
TCPII-F	bi	22,86	kg/m³/MPa
	b	368,00	kg/m³
	p	16,10	MPa
TSCA10	bi	13,48	kg/m³/MPa
	b	337,00	kg/m³
	p	25,00	MPa



Fonte: a Autora (2023)

Figura 62 - INTENSIDADE DE LIGANTE – 91 DIAS

TCPV	bi	10,85	kg/m³/MPa
	b	369,00	kg/m³
	p	34,00	MPa
TCPIV	bi	13,15	kg/m³/MPa
	b	367,00	kg/m³
	p	27,90	MPa
TSCA20	bi	7,02	kg/m³/MPa
	b	304,00	kg/m³
	p	43,30	MPa
TCPII-F	bi	14,96	kg/m³/MPa
	b	368,00	kg/m³
	p	24,60	MPa
TSCA10	bi	9,66	kg/m³/MPa
	b	337,00	kg/m³
	p	34,90	MPa



Fonte: a Autora (2023)

Quanto à intensidade do ligante (*bi*), observaram-se valores variando de 7,07 a 22,86 kg/m³/MPa para a idade de 28 dias. O menor valor de *bi,* 7,07 kg/m³/MPa, foi alcançado pelo concreto contendo substituição de 20% de cimento Portland (TSCA20), em volume, por sílica de casca de arroz, atingindo, aos 28 dias, resistência à compressão de 43,03 MPa. Já para a idade de 91 dias, o menor valor de bi foi correspondente a 7,02 kg/m³/MPa, também atribuído ao TSCA20.

Ao estudar o índice bi, Medeiros *et al*. (2019) obtiveram os maiores valores para concretos com resistência entre 20 e 30 MPa, sendo que na presente pesquisa, o maior bi foi correspondente a um concreto de 16,10 MPa (menor resistência à compressão dentre os concretos estudados).

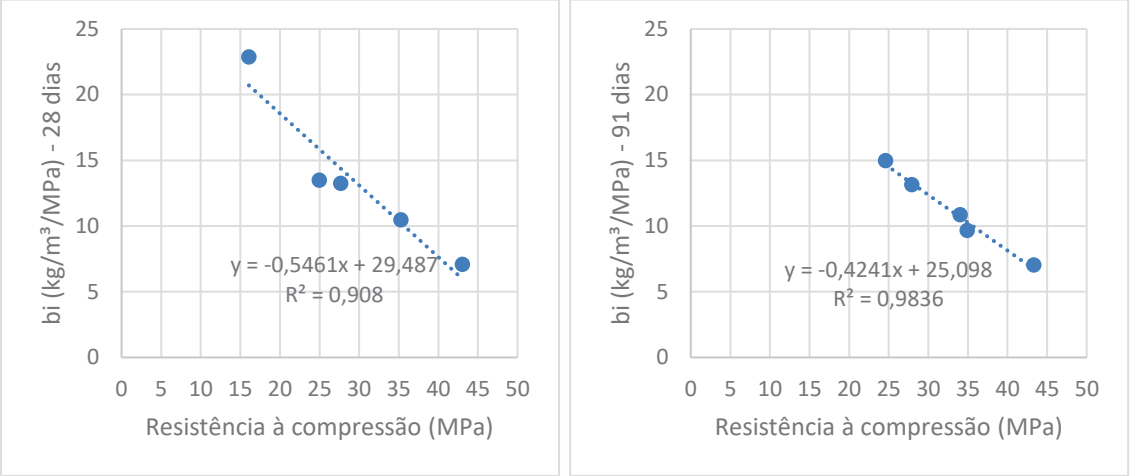
O consumo de aglomerante variou entre 304 e 369 kg/m³, atendendo ao consumo mínimo da NBR 12655 (2015), sujeito à avaliação da classe de agressividade ambiental. A faixa de resultados obtida está próxima do que também foi observado por Medeiros *et al*. (2019), que descreveram, para um intervalo de resistência de 20 a 60 MPa, o consumo de aglomerante de 300 a 500 kg/m³.

Os resultados de Medeiros *et al*. (2019) e Damineli *et al*. (2010) indicaram uma tendência de diminuição dos valores de bi (intensidade de ligante) com o aumento da resistência à compressão, que significa que fabricar concreto com maior resistência à compressão tende a resultar em menor necessidade de consumo de aglomerante por MPa produzido. Isso corrobora com os dados obtidos na presente pesquisa, também, quando há indicativo de que o concreto com menor valor da resistência à compressão (TCPII-F) é o que também apresenta maior consumo de aglomerante por MPa de resistência à compressão.

A Figura 63 apresenta a correlação entre a intensidade de ligante e resistência à compressão aos 28 e 91 dias das amostras.

Entre o índice bi e a resistência à compressão, foi verificada correlação com R^2 equivalente a 0,908 para 28 dias que, segundo o critério de Shimakura (2002), pode ser classificado como uma correlação muito forte; assim como R^2 para 91 dias corresponde a 0,9836. Para Medeiros et al. (2019), a correlação encontrada aos 28 dias foi de 0,8076.

Figura 63 - CORRELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE LIGANTE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO



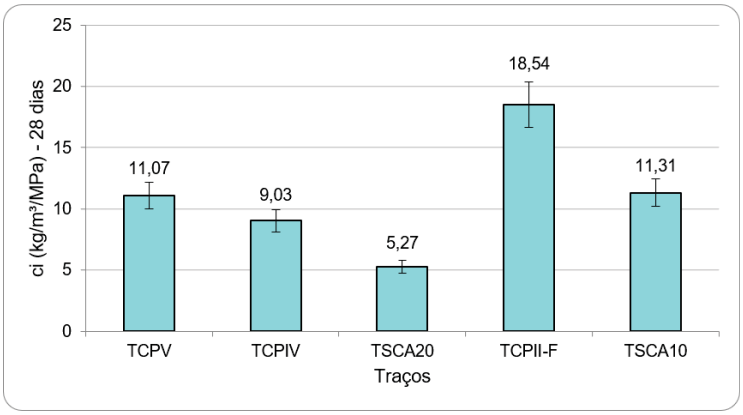
Fonte: a Autora (2023)

4.9.1.2. Intensidade de CO_2 (*ci*)

A Figura 64 apresenta a intensidade de CO_2 das amostras aos 28 dias.

Figura 64 - INTENSIDADE DE CO_2 – 28 DIAS

TCPV	ci	11,07	kg/m³/MPa
	c	370,99	kg/m³
	p	33,50	MPa
TCPIV	ci	9,03	kg/m³/MPa
	c	250,27	kg/m³
	p	27,70	MPa
TSCA20	ci	5,27	kg/m³/MPa
	c	226,76	kg/m³
	p	43,00	MPa
TCPII-F	ci	18,54	kg/m³/MPa
	c	298,41	kg/m³
	p	16,10	MPa
TSCA10	ci	11,31	kg/m³/MPa
	c	282,83	kg/m³
	p	25,00	MPa

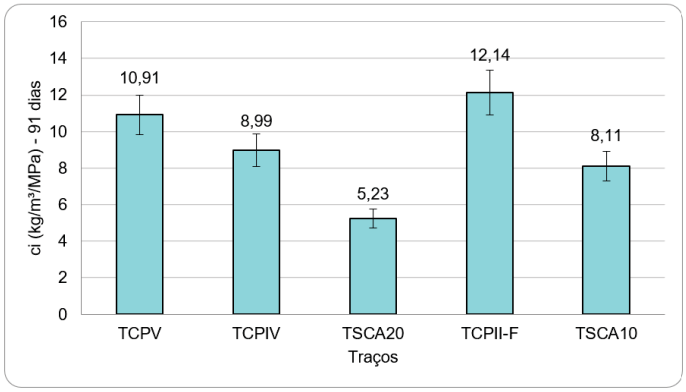


Fonte: a Autora (2023)

A Figura 65 apresenta a intensidade de CO_2 das amostras aos 91 dias.

Figura 65 - INTENSIDADE DE CO_2 – 91 DIAS

TCPV	ci	10,91	kg/m³/MPa
	c	370,99	kg/m³
	p	34,00	MPa
TCPIV	ci	8,99	kg/m³/MPa
	c	250,27	kg/m³
	p	27,85	MPa
TSCA20	ci	5,23	kg/m³/MPa
	c	226,76	kg/m³
	p	43,33	MPa
TCPII-F	ci	12,14	kg/m³/MPa
	c	298,41	kg/m³
	p	24,58	MPa
TSCA10	ci	8,11	kg/m³/MPa
	c	282,83	kg/m³
	p	34,88	MPa



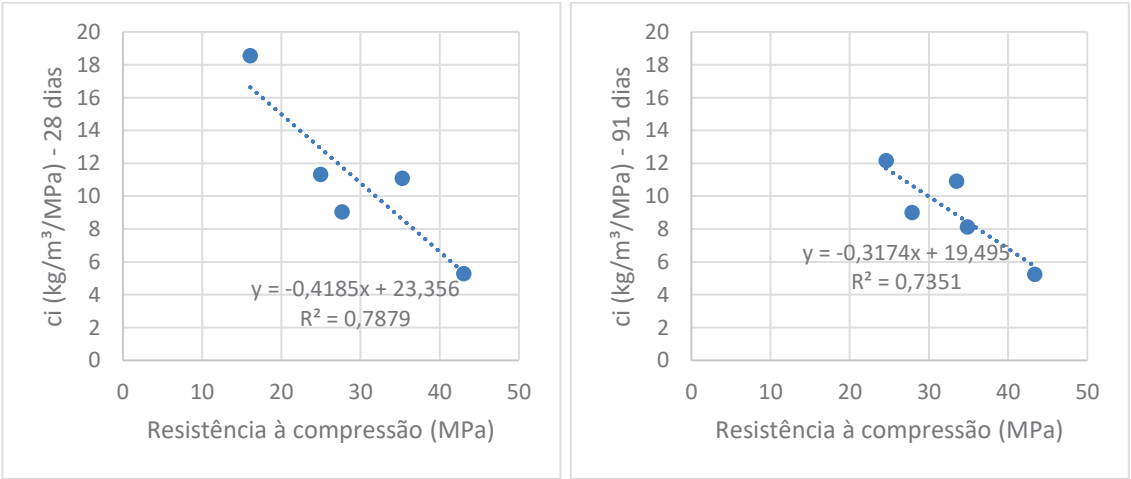
Fonte: a Autora (2023)

O maior índice *ci* aos 28 dias foi verificado para o traço TCPII-F (18,54 kg/m³/MPa), seguido pelo TSCA10 (11,31 kg/m³/MPa), TCPV (11,07 kg/m³/MPa), TCPIV (9,03 kg/m³/MPa) e TSCA20 (5,27 kg/m³/MPa). A quantidade de CO_2 emitida por m³ de concreto variou de 226,76 kg/m³/MPa a 370,99 kg/m³/MPa, estando compreendida pela faixa também obtida por Medeiros *et al*. (2019) e Damineli *et al*. (2010).

Aos 91 dias, o maior *ci* observado corresponde ao TCPII-F (12,14 kg/m³/MPa), seguido pelo TCPV (10,91 kg/m³/MPa), TCPIV (8,99 kg/m³/MPa), TSCA10 (8,11 kg/m³/MPa) e TSCA20 (5,23 kg/m³/MPa).

A Figura 66 apresenta a correlação entre a intensidade de CO_2 e resistência à compressão.

Figura 66 - CORRELAÇÃO INTENSIDADE DE CO_2 E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO



Fonte: a Autora (2023)

Medeiros *et al*. (2019) descreveram que, quanto ao ci (intensidade de CO_2), infere-se que concretos com maiores valores de resistência à compressão emitam menores quantidades de CO_2 à atmosfera para cada MPa de resistência. Esses autores discutem que concretos até 60 MPa apresentam valores de CO_2 emitidos de 150 a 350 kg/m³, enquanto que concretos acima de 60 MPa variam de 300 a 500 kg/m³.

Medeiros *et al*. (2019) obtiveram uma faixa de resultados para ci entre 3,59 kg/m³/MPa e 10,31 kg/m³/MPa; Damineli *et al.* (2010) verificaram valores de *ci* compreendidos pela faixa 1,5 kg/m³/MPa e 22 kg/m³/MPa. Os maiores valores de *ci* observados nesta pesquisa foram de 18,54 kg/m³/MPa (aos 28 dias), e 12,14 kg/m³/MPa (aos 91 dias), e referem-se ao concreto TCPII-F, enquanto que os menores valores de *ci* foram de 5,27 kg/m³/MPa (para 28 dias), e 5,23 kg/m³/MPa (aos 91 dias) e são pertencentes ao mesmo concreto com menor *bi*, TSCA20, esse padrão foi o encontrado por Medeiros *et al*. (2019). Damineli (2013) discute que para cimentos "puros" (sem adições), é possível atingir um *ci* estimado de até 4,3 kg/m³/MPa, se o *bi* for minimizado.

4.9.1.3. Intensidade de migração de cloretos (*bm*) e intensidade de resistividade elétrica (*br*)

Medeiros *et al.* (2019), baseados nos índices de Damineli *et al.* (2010), desenvolveram dois outros novos índices, relacionados à durabilidade: intensidade de resistividade elétrica (*br*) e intensidade de migração de cloretos (*bm*). As Equações 11 e 12 apresentam o cálculo dos coeficientes de durabilidade. Os indicadores de desempenho para os índices de durabilidade *br* e *bm* são os resultados dos ensaios de resistividade elétrica e migração de íons cloreto.

$$br = \frac{\frac{kg\ de\ aglomerante}{m^3 do\ concreto}}{k\Omega cm} \tag{11}$$

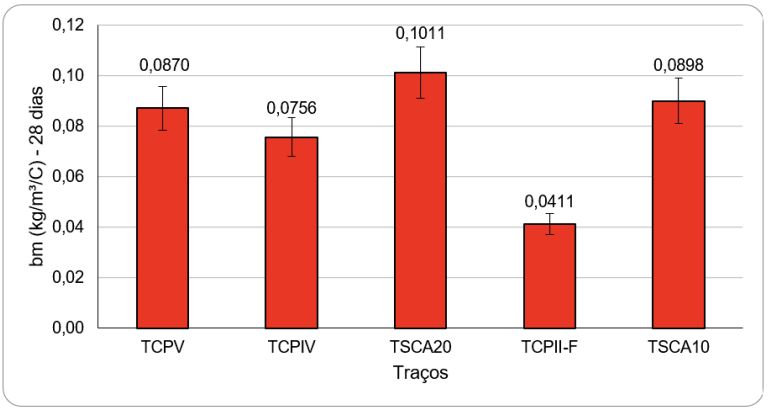
$$bm = \frac{\frac{kg\ de\ aglomerante}{m^3 do\ concreto}}{Coulombs} \tag{12}$$

- Índice bm

A Figura 67 mostra o gráfico que representa a intensidade da resistência à penetração de cloretos para cada traço aos 28 dias. O indicador bm é do tipo quanto maior, melhor; o menor valor de bm foi obtido para o traço TCPII-F, com 0,0411 kg/m³/C, enquanto que o maior corresponde ao traço TSCA20, com 0,1011 kg/m³/C.

Figura 67 - INTENSIDADE DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS – 28 DIAS

TCPV	bm	0,08705	kg/m³/C
	b	369,00	kg/m³
	p	4239,02	Coulombs
TCPIV	bm	0,07561	kg/m³/C
	b	367,00	kg/m³
	p	4853,95	Coulombs
TSCA20	bm	0,10113	kg/m³/C
	b	304,00	kg/m³
	p	3006,05	Coulombs
TCPII-F	bm	0,04107	kg/m³/C
	b	368,00	kg/m³
	p	8960,22	Coulombs
TSCA10	bm	0,08983	kg/m³/C
	b	337,00	kg/m³
	p	3751,34	Coulombs

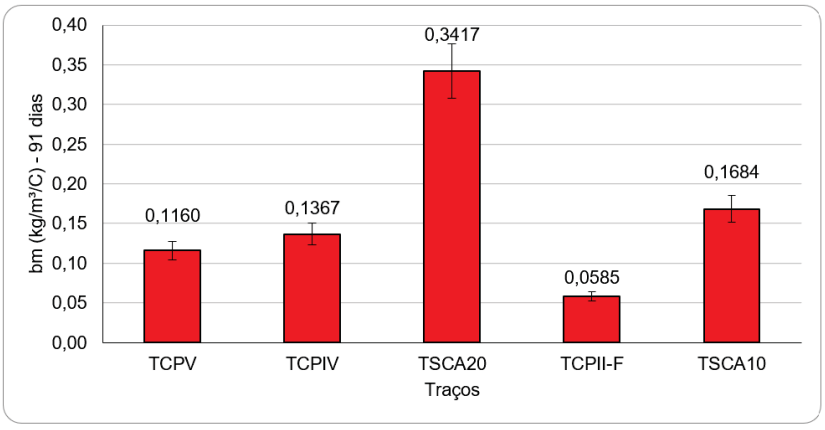


Fonte: a Autora (2023)

A Figura 68 mostra o gráfico que representa a intensidade da resistência penetração de cloretos para cada traço aos 91 dias. O maior valor obtido corresponde ao traço TSCA20, 0,3417 kg/m³/C, enquanto que o menor valor obtido está relacionado ao traço TCPII-F, 0,0585 kg/m³/C.

Figura 68 - INTENSIDADE DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS – 91 DIAS

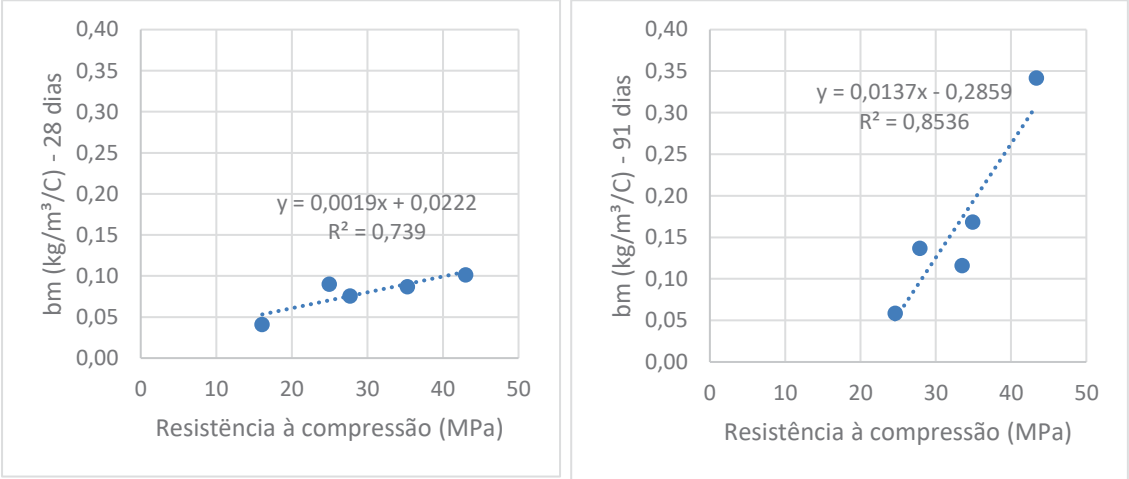
TCPV	bm	0,1160	kg/m³/C
	b	369,00	kg/m³
	p	3181,48	Coulombs
TCPIV	bm	0,1367	kg/m³/C
	b	367,00	kg/m³
	p	2685,15	Coulombs
TSCA20	bm	0,3417	kg/m³/C
	b	304,00	kg/m³
	p	889,67	Coulombs
TCPII-F	bm	0,0585	kg/m³/C
	b	368,00	kg/m³
	p	6295,95	Coulombs
TSCA10	bm	0,1684	kg/m³/C
	b	337,00	kg/m³
	p	2001,22	Coulombs



Fonte: a Autora (2023)

A Figura 69 apresenta os gráficos de correlação entre o índice bm e a resistência à compressão para as duas idades consideradas neste estudo, 28 e 91 dias.

Figura 69 - INTENSIDADE DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO



Fonte: a Autora (2023)

Medeiros *et al.* (2014) observaram, para *bm* (intensidade da migração de cloretos), que houve um crescimento conforme aumento da resistência à compressão (relação direta, obtida por esta pesquisa, também).

Medeiros *et al*. (2019), ao correlacionarem o índice *bm* e a resistência à compressão, obtiveram R² equivalente a 0,7555 aos 28 dias; valor próximo do obtido por esta pesquisa, que encontrou R² equivalente a 0,7390 aos 28 dias e R² de 0,8536 aos 91 dias. Pelo critério de Shimakura (2002), as correlações são consideradas fortes.

Conforme Medeiros e Helene (2003), quanto maior a resistência à compressão, menor a carga passante e, dessa maneira, maior o valor do índice *bm*.

- <u>Índice br</u>

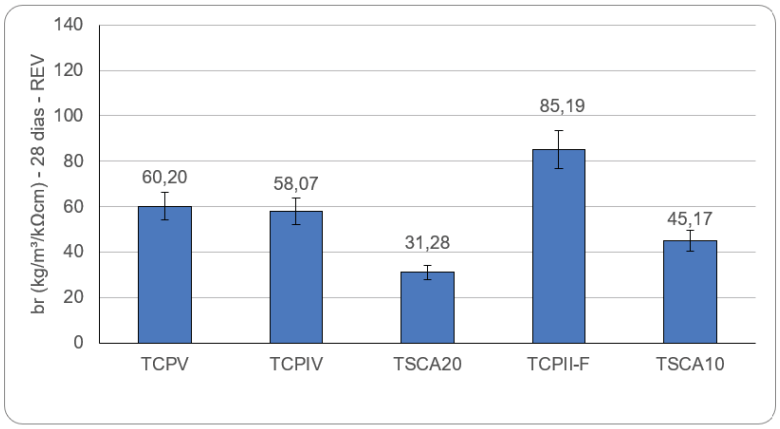
Como o índice *br* é inversamente proporcional à resistividade elétrica do material, concretos com maiores valores de resistividade elétrica tendem a apresentar menores valores de *br* (Medeiros *et al*., 2019). É um indicador do tipo quanto menor, melhor.

A Figura 70 mostra o gráfico que representa a intensidade da resistividade elétrica volumétrica para cada traço aos 28 dias. O maior e menor valores encontrados

para o índice *br* relativo à REV foram de 85,19 kg/m³/kΩcm (TCPII-F) e 31,28 kg/m³/kΩcm (TSCA20), respectivamente.

Figura 70 - INTENSIDADE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA - REV – 28 DIAS

TCPV	br	60,20	kg/m³/kΩcm
	b	369,00	kg/m³
	p	6,13	kΩcm
TCPIV	br	58,07	kg/m³/kΩcm
	b	367,00	kg/m³
	p	6,32	kΩcm
TSCA20	br	31,28	kg/m³/kΩcm
	b	304,00	kg/m³
	p	9,72	kΩcm
TCPII-F	br	85,19	kg/m³/kΩcm
	b	368,00	kg/m³
	p	4,32	kΩcm
TSCA10	br	45,17	kg/m³/kΩcm
	b	337,00	kg/m³
	p	7,46	kΩcm

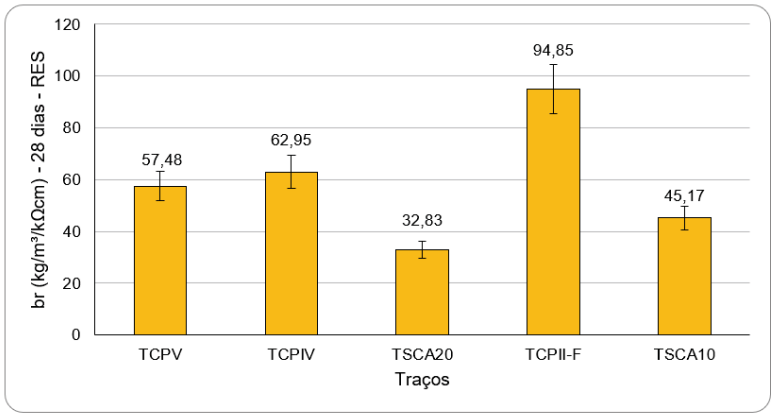


Fonte: a Autora (2023)

A Figura 71 mostra o gráfico que representa a intensidade da resistividade elétrica superficial para cada traço (br). O maior e menor valores encontrados para o índice *br* relativo à RES foram, aos 28 dias, 94,85 kg/m³/kΩcm (TCPII-F) e 32,83 kg/m³/kΩcm (TSCA20), respectivamente.

Figura 71 - INTENSIDADE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA - RES – 28 DIAS

TCPV	br	57,48	kg/m³/kΩcm
	b	369,00	kg/m³
	p	6,42	kΩcm
TCPIV	br	62,95	kg/m³/kΩcm
	b	367,00	kg/m³
	p	5,83	kΩcm
TSCA20	br	32,83	kg/m³/kΩcm
	b	304,00	kg/m³
	p	9,26	kΩcm
TCPII-F	br	94,85	kg/m³/kΩcm
	b	368,00	kg/m³
	p	3,88	kΩcm
TSCA10	br	45,17	kg/m³/kΩcm
	b	337,00	kg/m³
	p	7,46	kΩcm

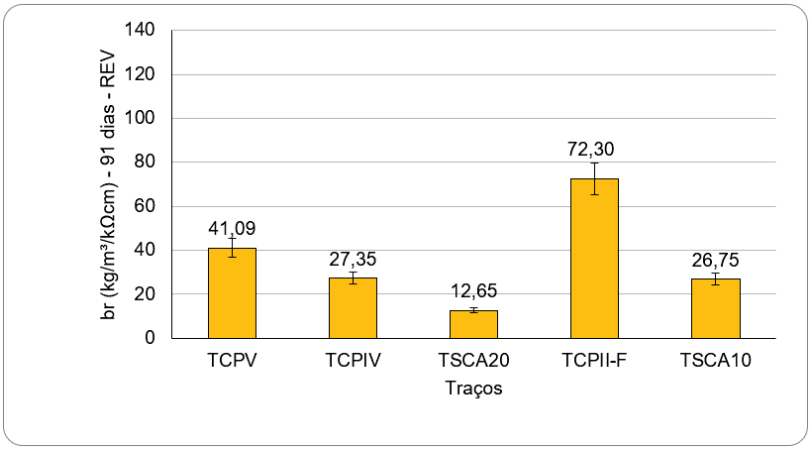


Fonte: a Autora (2023)

A Figura 72 mostra o gráfico que representa a intensidade da resistividade elétrica volumétrica para cada traço aos 91 dias. O maior e menor valores encontrados para o índice *br* relativo à REV foram de 72,30 kg/m³/kΩcm (TCPII-F) e 12,65 kg/m³/kΩcm (TSCA20), mantendo-se o menor e maior valores para os mesmos traços elencados aos 28 dias.

Figura 72 - INTENSIDADE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA - REV – 91 DIAS

TCPV	br	41,09	kg/m³/kΩcm
	b	369,00	kg/m³
	p	8,98	kΩcm
TCPIV	br	27,35	kg/m³/kΩcm
	b	367,00	kg/m³
	p	13,42	kΩcm
TSCA20	br	12,65	kg/m³/kΩcm
	b	304,00	kg/m³
	p	24,03	kΩcm
TCPII-F	br	72,30	kg/m³/kΩcm
	b	368,00	kg/m³
	p	5,09	kΩcm
TSCA10	br	26,75	kg/m³/kΩcm
	b	337,00	kg/m³
	p	12,60	kΩcm

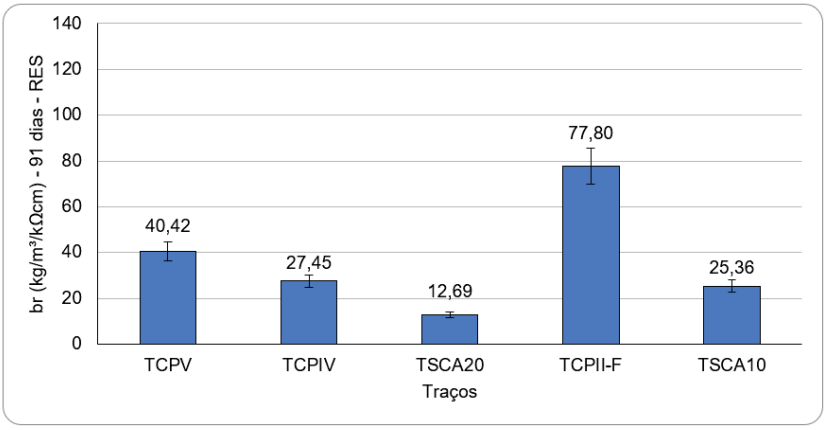


Fonte: a Autora (2023)

A Figura 73 mostra o gráfico que representa a intensidade da resistividade elétrica superficial para cada traço (br). O maior e menor valores encontrados para o índice *br* relativo à RES foram, aos 91 dias, 77,80 kg/m³/kΩcm (TCPII-F) e 12,69 kg/m³/kΩcm (TSCA20), valores próximos do que foi obtido para REV.

Figura 73 - INTENSIDADE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA - RES – 91 DIAS

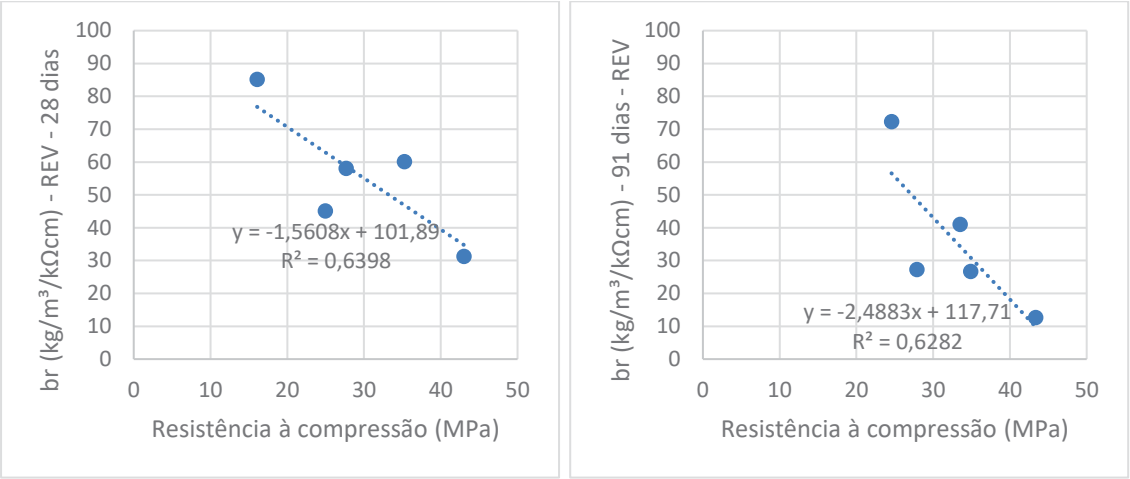
TCPV	br	40,42	kg/m³/kΩcm
	b	369,00	kg/m³
	p	9,13	kΩcm
TCPIV	br	27,45	kg/m³/kΩcm
	b	367,00	kg/m³
	p	13,37	kΩcm
TSCA20	br	12,69	kg/m³/kΩcm
	b	304,00	kg/m³
	p	23,96	kΩcm
TCPII-F	br	77,80	kg/m³/kΩcm
	b	368,00	kg/m³
	p	4,73	kΩcm
TSCA10	br	25,36	kg/m³/kΩcm
	b	337,00	kg/m³
	p	13,29	kΩcm



Fonte: a Autora (2023)

A Figura 74 retrata a correlação inversa entre o índice br (REV) e a resistência à compressão aos 28 e 91 dias de idade das amostras; enquanto os valores da resistência à compressão aumentam, os índices br diminuem. Aos 28 dias e 91 dias, a correlação pode ser definida como moderada.

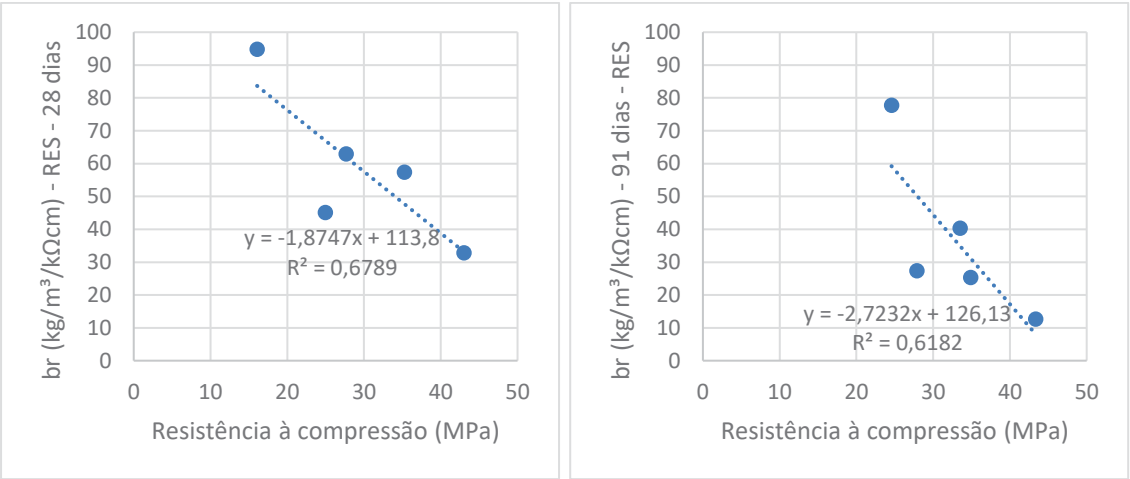
Figura 74 - DADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA – CURVA RESISTÊNCIA MECÂNICA – INTENSIDADE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA



Fonte: a Autora (2023)

A Figura 75 retrata a correlação inversa, também, assim como na REV, entre o índice br (RES) e a resistência à compressão aos 28 e 91 dias de idade das amostras. A correlação nas duas idades pode ser definida como moderada.

Figura 75 - DADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL – CURVA RESISTÊNCIA MECÂNICA – INTENSIDADE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL



Fonte: a Autora (2023)

Medeiros *et al*. (2014) verificaram que concretos com maiores resistências tendem a apresentar menores valores de br (intensidade de resistividade elétrica), o que valida os resultados desta pesquisa. O aumento da resistência à compressão de forma simultânea à resistividade elétrica é devido às mudanças que ocorrem na densificação da matriz cimentícia ao longo do tempo; especialmente nas primeiras idades, até 91 dias (MEDEIROS *et al*., 2019).

4.9.1.4. Intensidade de permeabilidade ao ar (*bperm*), intensidade de absorção de água por capilaridade (ac), intensidade de absorção de água por imersão (ai), índice de vazios

A partir dos índices propostos por Medeiros *et al*. (2019) e Damineli *et al*. (2010), esta pesquisa propõe outros quatro índices referentes à durabilidade baseados na intensidade da permeabilidade ao ar (*bperm,* Equação 13), intensidade de absorção de água por capilaridade (*ac,* Equação 14), intensidade de absorção de água por imersão (*ai,* Equação 15) e intensidade índice de vazios (*iv,* Equação 16).

$$bperm = \frac{\frac{kg\ de\ aglomerante}{m^3 do\ concreto}}{E\hat{}(-16)\ m^2} \tag{13}$$

$$ac = \frac{\frac{kg\ de\ aglomerante}{m^3 do\ concreto}}{g/cm^2} \tag{14}$$

$$ai = \frac{\frac{kg\ de\ aglomerante}{m^3 do\ concreto}}{\%} \tag{15}$$

$$iv = \frac{\frac{kg\ de\ aglomerante}{m^3 do\ concreto}}{\%} \tag{16}$$

- Índice *bperm*

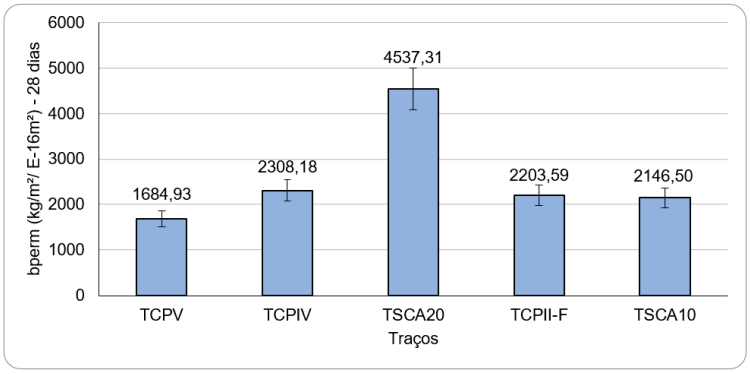
O indicador que se refere à permeabilidade ao ar é um indicador do tipo quanto maior, melhor. É inversamente proporcional à permeabilidade ao ar, concretos com maior permeabilidade tendem a apresentar menores valores de *bperm.*

A Figura 76 mostra o gráfico que representa a intensidade da permeabilidade ao ar para cada traço aos 28 dias. O maior valor de *bperm* foi obtido para o traço

TSCA20, com 4537,31 kg/m³/E^{-16} m², e o menor corresponde ao traço TCPV, 1684,93 kg/m³/E^{-16} m².

Figura 76 - INTENSIDADE DE PERMEABILIDADE AO AR – 28 DIAS

TCPV	bperm	1684,93	kg/m³/E-16 m²
	b	369,00	kg/m³
	p	0,22	E-16m²
TCPIV	bperm	2308,18	kg/m³/E-16 m²
	b	367,00	kg/m³
	p	0,16	E-16m²
TSCA20	bperm	4537,31	kg/m³/E-16 m²
	b	304,00	kg/m³
	p	0,07	E-16m²
TCPII-F	bperm	2203,59	kg/m³/E-16 m²
	b	368,00	kg/m³
	p	0,17	E-16m²
TSCA10	bperm	2146,50	kg/m³/E-16 m²
	b	337,00	kg/m³
	p	0,16	E-16m²

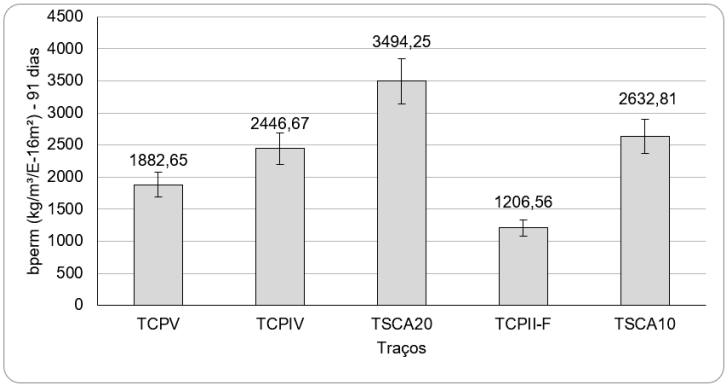


Fonte: a Autora (2023)

A Figura 77 mostra o gráfico que representa a intensidade da permeabilidade ao ar para cada traço aos 91 dias. O maior valor de *bperm* foi obtido para o traço TSCA20, com 3494,25 kg/m³/E^{-16} m², e o menor corresponde ao traço TCPII-F, 1206,56 kg/m³/E^{-16} m².

Figura 77 - INTENSIDADE DE PERMEABILIDADE AO AR – 91 DIAS

TCPV	bperm	1882,65	kg/m³/E-16m²
	b	369,00	kg/m³
	p	0,20	E-16m²
TCPIV	bperm	2446,67	kg/m³/E-16m²
	b	367,00	kg/m³
	p	0,15	E-16m²
TSCA20	bperm	3494,25	kg/m³/E-16m²
	b	304,00	kg/m³
	p	0,09	E-16m²
TCPII-F	bperm	1206,56	kg/m³/E-16m²
	b	368,00	kg/m³
	p	0,31	E-16m²
TSCA10	bperm	2632,81	kg/m³/E-16m²
	b	337,00	kg/m³
	p	0,13	E-16m²

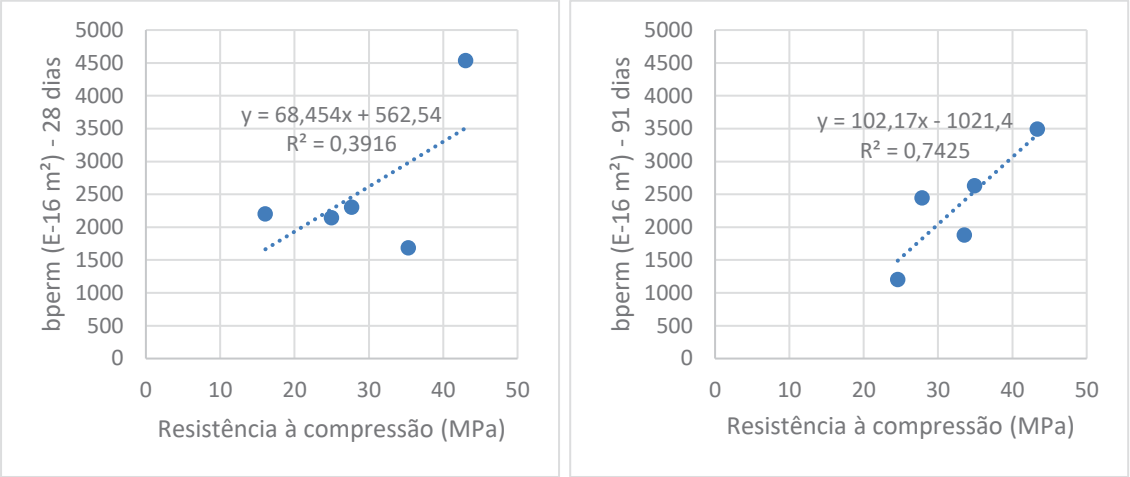


Fonte: a Autora (2023)

A Figura 78 identifica o gráfico de correlação entre o índice *bperm* e a resistência à compressão. Aos 28 dias, o R² obtido foi de 0,3916, indicando uma correlação fraca, enquanto que aos 91 dias, o R² encontrado foi de 0,7425, indicando uma correlação forte. Diante das correlações encontradas, não se pode classificar o índice como viável ou não, pois a análise não é conclusiva; recomendam-se, para

melhor avaliação, ensaios com mais repetições e maior variedade de traços visando maior precisão.

Figura 78 - CORRELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE PERMEABILIDADE AO AR E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – 28 E 91 DIAS



Fonte: a Autora (2023)

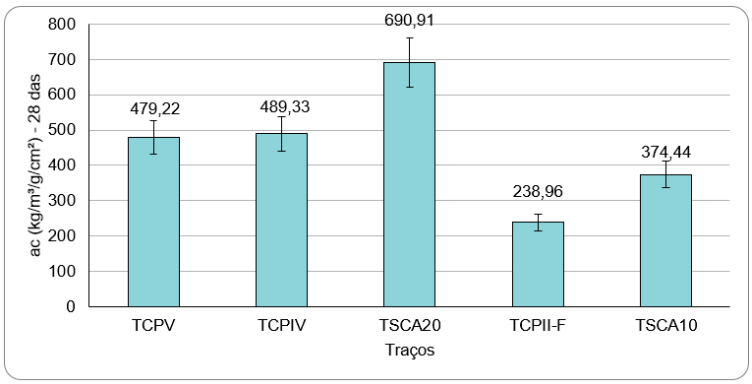
- Índice *ac*

O indicador que se refere à absorção de água por capilaridade é um indicador do tipo quanto maior, melhor. É inversamente proporcional à absorção capilar, concretos com maior absorção capilar tendem a apresentar menores valores de *ac.*

A Figura 79 mostra o gráfico que representa a intensidade absorção de água por capilaridade para cada traço aos 28 dias. O índice considerou como unidade de performance, a absorção obtida ao final do ensaio, 72h. Aos 28 dias, o maior valor para *ac* encontrado corresponde ao traço TSCA20, 690,91 kg/m³/g/cm², enquanto o menor valor encontrado corresponde ao traço TCPII-F, 238,96 kg/m³/g/cm².

Figura 79 - INTENSIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE – 28 DIAS

TCPV	ac	479,22	kg/m³/g/cm²
	b	369,00	kg/m³
	p	0,77	g/cm²
TCPIV	ac	489,33	kg/m³/g/cm²
	b	367,00	kg/m³
	p	0,75	g/cm²
TSCA20	ac	690,91	kg/m³/g/cm²
	b	304,00	kg/m³
	p	0,44	g/cm²
TCPII-F	ac	238,96	kg/m³/g/cm²
	b	368,00	kg/m³
	p	1,54	g/cm²
TSCA10	ac	374,44	kg/m³/g/cm²
	b	337,00	kg/m³
	p	0,90	g/cm²

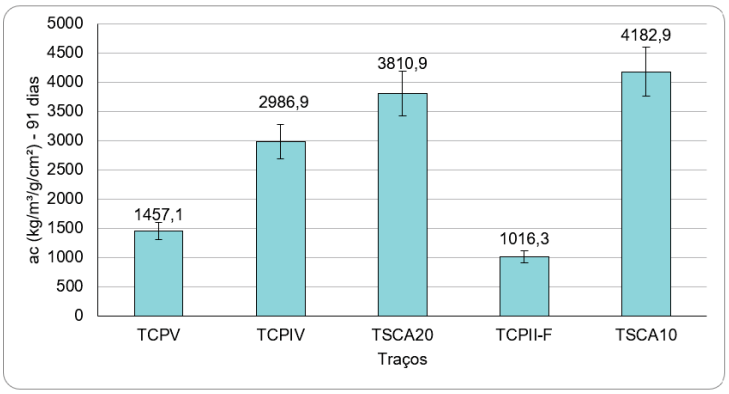


Fonte: a Autora (2023)

A Figura 80 mostra o gráfico que representa a intensidade absorção de água por capilaridade para cada traço aos 91 dias. O maior valor de *ac* foi obtido para o traço TSCA10, e o menor corresponde ao traço TCPII-F. Aos 91 dias, o maior valor encontrado corresponde ao traço TSCA10, 4182,90 kg/m³/g/cm², enquanto que o menor valor é relativo ao TCPII-F, 1016,3 kg/m³/g/cm².

Figura 80 - INTENSIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE – 91 DIAS

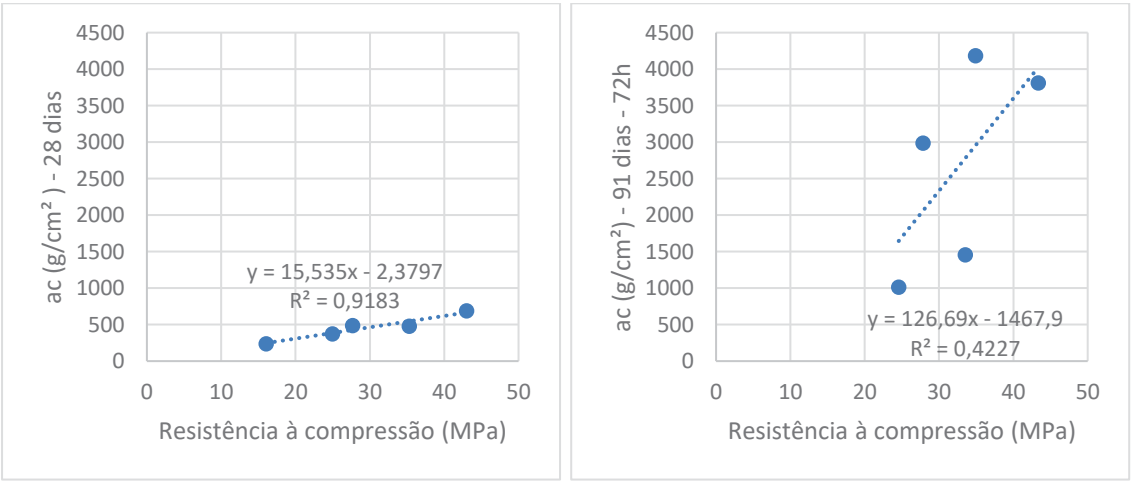
TCPV	ac	1457,11	kg/m³/g/cm²
	b	369,00	kg/m³
	p	0,25	g/cm²
TCPIV	ac	2986,87	kg/m³/g/cm²
	b	367,00	kg/m³
	p	0,12	g/cm²
TSCA20	ac	3810,92	kg/m³/g/cm²
	b	304,00	kg/m³
	p	0,08	g/cm²
TCPII-F	ac	1016,33	kg/m³/g/cm²
	b	368,00	kg/m³
	p	0,36	g/cm²
TSCA10	ac	4182,92	kg/m³/g/cm²
	b	337,00	kg/m³
	p	0,08	g/cm²



Fonte: a Autora (2023)

A Figura 81 correlaciona resistência à compressão e absorção capilar aos 28 e 91 dias, sendo o R² correspondente 0,9183 (muito forte) e 0,4227 (moderado), respectivamente.

Figura 81 - CORRELAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO CAPILAR E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO



Fonte: a Autora (2023)

Diante das correlações encontradas, não se pode classificar o índice como viável ou não, pois a análise não é conclusiva; recomendam-se, para melhor avaliação, ensaios com mais repetições e maior variedade de traços visando maior precisão.

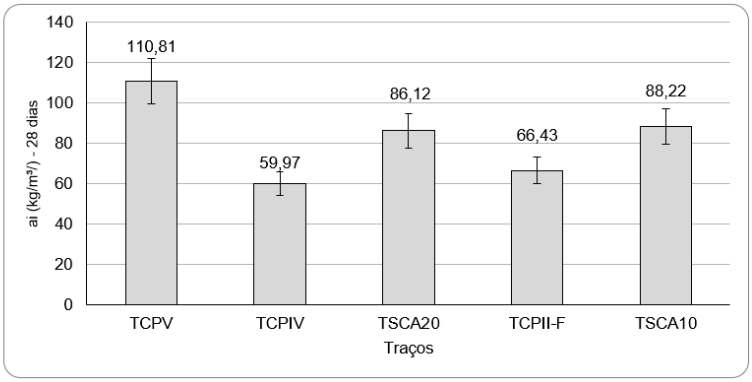
- Índice *ai*

O indicador que se refere à absorção de água por imersão é um indicador do tipo quanto maior, melhor. É inversamente proporcional à absorção por imersão, concretos com maior absorção por imersão tendem a apresentar menores valores de *ai.*

A Figura 82 apresenta, para cada traço, aos 28 de idade das amostras, os resultados obtidos no cálculo da intensidade da absorção por imersão. O maior *ai* obtido foi correspondente ao traço TCPV, e o menor, TCPIV.

Figura 82 - INTENSIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO – 28 DIAS

TCPV	ai	110,81	kg/m³/
	b	369,00	kg/m³
	p	3,33	%
TCPIV	ai	59,97	kg/m³/
	b	367,00	kg/m³
	p	6,12	%
TSCA20	ai	86,12	kg/m³/
	b	304,00	kg/m³
	p	3,53	%
TCPII-F	ai	66,43	kg/m³/
	b	368,00	kg/m³
	p	5,54	%
TSCA10	ai	88,22	kg/m³/
	b	337,00	kg/m³
	p	3,82	%

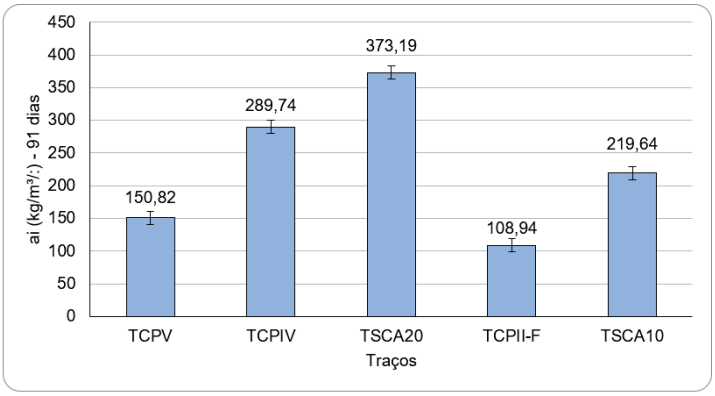


Fonte: a Autora (2023)

A Figura 83 apresenta, para cada traço, aos 91 dias de idade das amostras, os resultados obtidos no cálculo da intensidade da absorção por imersão. O maior *ai* obtido foi correspondente ao traço TSCA20, e o menor índice para o TCPII-F.

Figura 83 - INTENSIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO – 91 DIAS

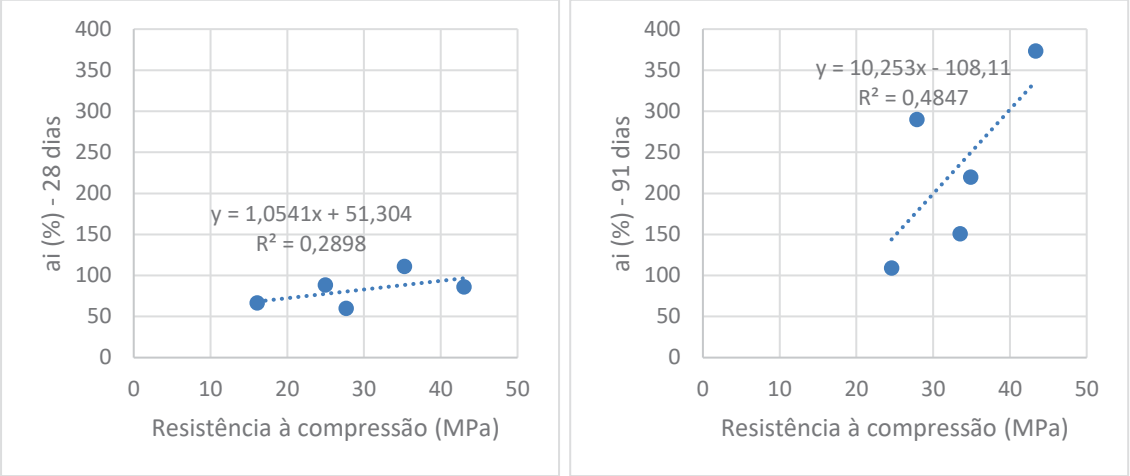
TCPV	ai	150,82	kg/m³/
	b	369,00	kg/m³
	p	2,45	
TCPIV	ai	289,74	kg/m³/
	b	367,00	kg/m³
	p	1,27	
TSCA20	ai	373,19	kg/m³/
	b	304,00	kg/m³
	p	0,81	
TCPII-F	ai	108,94	kg/m³/
	b	368,00	kg/m³
	p	3,38	
TSCA10	ai	219,64	kg/m³/
	b	337,00	kg/m³
	p	1,53	



Fonte: a Autora (2023)

A Figura 84 apresenta a correlação entre o índice ai e a resistência à compressão para os 28 e 91 dias, com R² de 0,2898 e 0,4847, respectivamente, podendo ser classificado como fraco e moderado, pelo critério de Shimakura (2002). De acordo com esses dados encontrados nas correlações para as duas idades, o uso deste índice não pode ser considerado como viável, já que a análise não foi conclusiva, recomendam-se, para melhor avaliação, ensaios com mais repetições e maior variedade de traços visando maior precisão.

Figura 84 - CORRELAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO



Fonte: a Autora (2023)

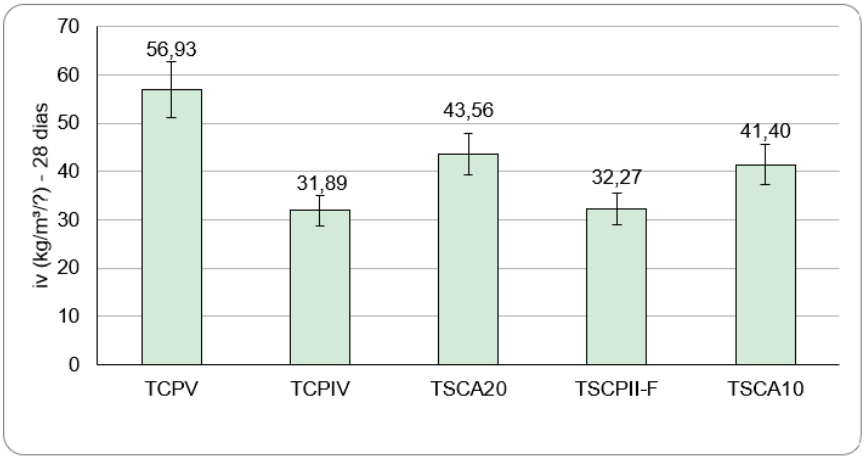
- Índice *iv*

O indicador que se refere ao índice de vazios é um indicador do tipo quanto maior, melhor. É inversamente proporcional ao índice de vazios, concretos com mais vazios tendem a apresentar menores valores de *iv.*

A Figura 85 mostra a intensidade do índice de vazios para cada traço, aos 28 dias de idade das amostras. Aos 28 dias, o maior valor encontrado para esse indicador foi correspondente ao traço TCPV, enquanto que o menor foi correspondente a TCPIV.

Figura 85 - INTENSIDADE DO ÍNDICE DE VAZIOS– 28 DIAS

TCPV	iv	56,93	kg/m³/
	b	369,00	kg/m³
	p	6,48	%
TCPIV	iv	31,89	kg/m³/
	b	367,00	kg/m³
	p	11,51	%
TSCA20	iv	43,56	kg/m³/
	b	304,00	kg/m³
	p	6,98	%
TCPII-F	iv	32,27	kg/m³/
	b	368,00	kg/m³
	p	11,40	%
TSCA10	iv	41,40	kg/m³/
	b	337,00	kg/m³
	p	8,14	%

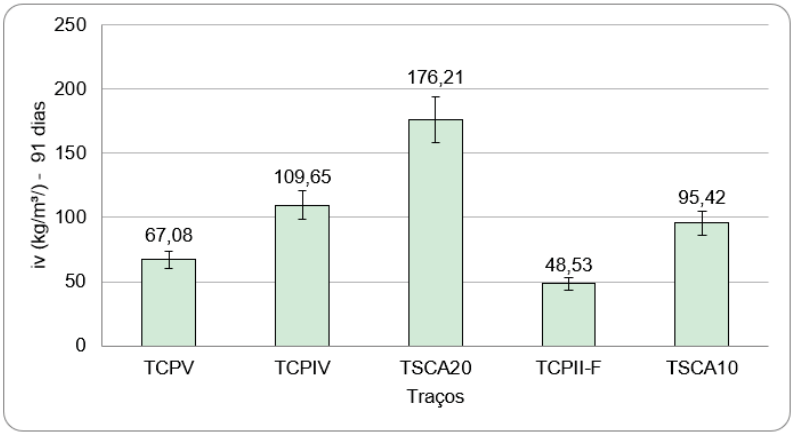


Fonte: a Autora (2023)

A Figura 86 mostra a intensidade do índice de vazios para cada traço, aos 91 dias de idade das amostras. Aos 91 dias, o maior valor encontrado para o índice foi correspondente ao traço TSCA20, enquanto que o menor foi correspondente ao traço TCPII-F.

Figura 86 - INTENSIDADE DO ÍNDICE DE VAZIOS– 91 DIAS

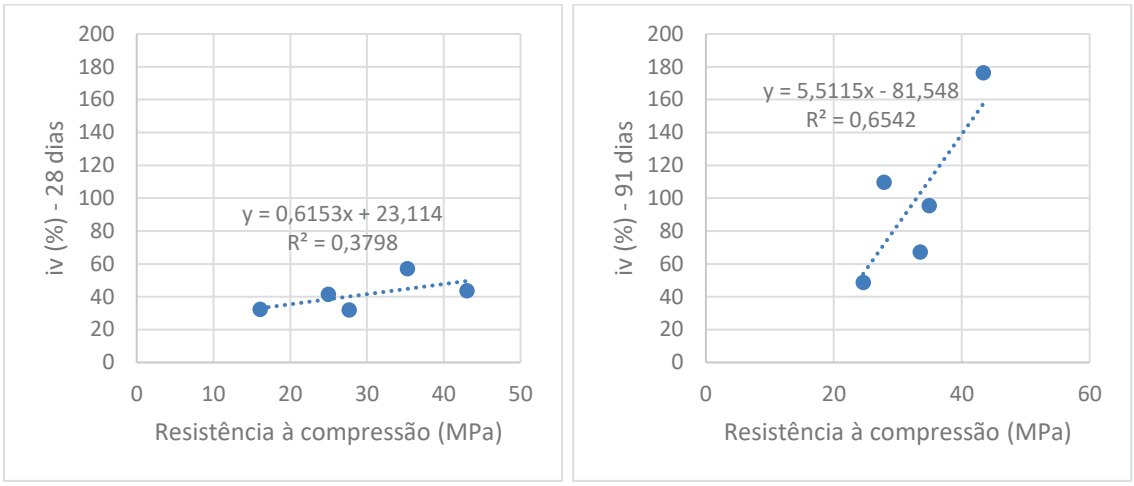
TCPV	iv	67,08	kg/m³/
	b	369,00	kg/m³
	p	5,50	%
TCPIV	iv	109,65	kg/m³/
	b	367,00	kg/m³
	p	3,35	%
TSCA20	iv	176,21	kg/m³/
	b	304,00	kg/m³
	p	1,73	%
TCPII-F	iv	48,53	kg/m³/
	b	368,00	kg/m³
	p	7,58	%
TSCA10	iv	95,42	kg/m³/
	b	337,00	kg/m³
	p	3,53	%



Fonte: a Autora (2023)

A Figura 87 mostra as correlações entre a intensidade do índice de vazios (iv) e a resistência à compressão aos 28 e 91 dias. Os R^2 encontrados correspondem a 0,3798 e 0,6542, respectivamente, estabelecendo uma fraca correlação e uma moderada correlação conforme o critério de Shimakura (2002). Diante das correlações encontradas, não se pode classificar o índice como viável ou não, pois a análise não é conclusiva; recomendam-se, para melhor avaliação, ensaios com mais repetições e maior variedade de traços visando maior precisão.

Figura 87 - CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICE DE VAZIOS E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO



Fonte: a Autora (2023)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

A partir do experimento desenvolvido, pode-se estabelecer as conclusões a seguir:

- A resistência à compressão aos 28 dias foi maior para o traço TSCA20, seguido pelo traço TCPV, TCPIV, TSCA10 e TCPII-F;
- Aos 91 dias, o maior valor de resistência à compressão também foi obtido pelo traço TSCA20. Em seguida, TSCA10, TCPIV, TCPV, TCPII-F;
- A RES e REV obtidas foram quase equivalentes para os concretos analisados (correlação com R^2 muito próximo de 1), ambas com resultados para os traços com substituição de cimento Portland, em volume, por sílica de casca de arroz, superiores ao traço de referência;
- Aos 28 dias, o R^2 que relaciona absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão é baixo para essa idade, 0,2429; sendo que, aos 91 dias, foi caracterizado como 0,9291;
- Constatou-se boa influência da sílica de casca de arroz incorporada ao concreto em relação à permeabilidade ao ar, com classificação do traço TSCA20 como “bom”, enquanto o concreto de referência está enquadrado como “normal”. Mesmo o traço TSCA10, com menor teor de adição da sílica de casca de arroz, apresentou melhora nos resultados em relação ao TCPV;
- Os traços TSCA20 e TSCA10 apresentaram os menores valores do coeficiente kT (no ensaio de permeabilidade ao ar) para as duas idades consideradas (28 e 91 dias);
- Os traços com adição de sílica de casca de arroz, TSCA10 e TSCA20, apresentaram resultados melhores se comparados ao traço de referência quando considerado ensaio de resistência à penetração de cloretos; a carga passante foi menor que a obtida para o traço de referência; o uso da sílica de casca de arroz contribuiu com a redução da penetrabilidade dos íons cloreto;
- Aos 28 dias, os traços TSCA20 e TSCA10 (com teor de substituição da sílica de casca de arroz) foram os únicos a apresentarem diminuição de carga passante no ensaio de resistência à penetração de cloretos em relação ao traço de referência;

- No ensaio de resistência à penetração de cloretos, houve maior carga passante (aumento de 35,48% em relação ao traço de referência) pelas amostras que foram moldadas a partir do traço que contém TCPII-F, indicando maior vulnerabilidade à penetração de cloretos;
- A intensidade de ligante, índice *bi*, dentre os traços analisados, foi menor para o TSCA20 em 47,47% em relação ao traço de referência; caracterizando o aglomerante como mais efetivo em termos de eficiência de uso de ligante;
- Conclui-se que o uso de sílica de casca de arroz em substituição ao cimento Portland contribuiu com o desempenho do concreto face aos indicadores de durabilidade;
    - ✓ O melhor índice *bi* aos 28 e aos 91 dias foi obtido para o traço TSCA20;
    - ✓ O melhor índice *ci* aos 28 e 91 dias de idade das amostras foi obtido para o traço TSCA20, indicando menor intensidade de CO_2 emitida para a produção deste traço;
    - ✓ Bom resultado em relação ao indicador de resistência à penetração de cloretos aos 28 dias;
    - ✓ Melhor índice *bm* aos 28 e 91 dias foi o traço TSCA20, seguido pelo traço TSCA10;
    - ✓ Melhor índice *br* aos 28 e 91 dias foi o traço TSCA20 seguido pelo traço TSCA10;
    - ✓ Melhor índice *bperm* aos 28 e 91 dias foi o traço TSCA20.
- Com os ensaios realizados, pode-se concluir que a incorporação de sílica de casca de arroz ao concreto contribui com a otimização das propriedades relacionadas à resistência mecânica e durabilidade. Além disso, o uso desse resíduo favorece a questão ambiental reduzindo o consumo de cimento Portland para cada MPa a ser produzido.

5.2. ARTIGOS EM DESENVOLVIMENTO DURANTE O MESTRADO

Estes são artigos em desenvolvimento, que se pretende publicar:

- Resistividade elétrica como parâmetro de ecoeficiência do concreto: um levantamento quantitativo na literatura existente- iniciado na disciplina de Escrita Acadêmica (em escrita);
- Revisão sobre relações entre resistência mecânica, resistividade elétrica e modelos de vida útil do concreto armado- (iniciado na disciplina de Reações Expansivas, em escrita);
- Resistividade elétrica como parâmetro de ecoeficiência do concreto com relação à durabilidade- (iniciado na disciplina de Corrosão, em escrita).

5.3. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com a experiência criada no desenvolvimento deste trabalho, pode-se sugerir os trabalhos de pesquisa a seguir como continuidade desta pesquisa:

- Estudo dos índices de ecoeficiência em outras idades do concreto, superiores a 91 dias;
- Estudo do índice de ecoeficiência relacionado à carbonatação em diferentes tipos de cimento;
- Estudo da influência de outras adições nos índices de ecoeficiência do concreto (cinza volante, metacaulim, sílica ativa);
- Estudo da influência da relação água/ cimento nos índices de ecoeficiência do concreto;
- Estudo dos índices de ecoeficiência para concretos com substituição de outros teores de sílica de casca de arroz (15%, 25%, 30%);
- Estudo da correlação entre absorção capilar e resistência à compressão.

REFERÊNCIAS

ABNT - **NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a, versão corrigida 2009.

ABNT - **NBR 9779- Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT - **ABNT NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.

ABNT - **NBR 5739 - Concreto - ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b.

ABNT - **NBR 12655 –Concreto. – Preparo, controle e recebimento**. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.ABNT –**NBR 5738- Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT - **NBR 15895- Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ABNT - **NBR 12653- Materiais pozolânicos- Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ADÁMEK, J. JURÁNKOVÁ, V. **Evaluation of durability of concrete by measurement of permeability for air and water.** Modern Building Materials, Structures and Techniques, 2010.

ADORNO, C. DOS S. **Efeitos Físico-Químicos De Adições Minerais Na Reatividade Álcali- Agregado Em Compósitos De Cimento Portland Efeitos Físico-Químicos De Adições Minerais Na Reatividade Álcali-agregado**. Dissertação (mestrado)—Curitiba: Universidade Federal Do Paraná, 2017.

AENOR. **UNE 83988-2: Durabilidad del hormigón – Métodos de ensayo – Determinación de la resistividad eléctrica – Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner.** Madrid: AENOR, 2014.

AKHTAR, T., ALI, B., KAHLA, N. B., KURDA, R., RIZWAN, M., JAVED, M. M., RAZA, A. **Experimental investigation of eco-friendly high strength fiber-reinforced concrete developed with combined incorporation of tyre-steel fiber and fly ash", Journal of Building Engineering,** v. 314, pp. 125626, January 2022.

ALMARSHOUD, M; MOSAVI, H; ALRASHIDI, R; ALYAMI, M. H. M; FERRARO, C. C; DEFORD, H. D; RIDING, K. A. **Use of Electrical Resistivity-Based Tests for Concrete Penetrability Measurement**. ACI Materials Journal, v. 118, n. 1, 2021.

ALNAHHAL, M. F. et al. **Assessment on engineering properties and CO_2 emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to ortland cement.** Journal of Cleaner Production, v. 203, p. 822-835, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test method for eletrical indication of concrete's ability to resist chloride íon penetration**. ASTM C-1202. In: Annual book of ASTM Standards. West Conshohocken, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM).. C1202-19: **Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. West Conshohocken**: ASTM International, 2019.

ANDRADE, C., IZQUIERDO, D. **Benchmarking through an algorithm of repair methods of reinforcement corrosion: The repair index method**, Cement and Concrete Composites, v. 27, p. 727-733, 2005.

ANDRADE, C. **Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurement**s. Cement and Concrete Research, v. 23, n. 3, p. 724–742, 1993.

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

ANDRADE, C.; D'ANDREA, R. **La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad**. Revista ALCONPAT, v. 1, n. 2, p. 90–98, 30 maio 2011.

ANDRADE, C. **Model for prediction of reinforced concrete service life based on electrical resistivity**, IBRACON Materials Journal, v. 1, n. 1, 2005.

ANDRADE, C., GONZÁLEZ Gasca, C. and TORRENT, R., **The suitability of the 'TPT' to measure the air-permeability of the covercrete**, ACI SP-192, 2000, p. 301-318.

ARAÚJO, E. C., MACIOSKI, G., MEDEIROS, M.H..F. "**Concrete surface electrical resistivity: effects of sample size, geometry, probe spacing and SCMs**", *Construction and Building* Materials, v 324, February, 2022.

AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: a review. **Advances in Materials Science and Engineering**, V. 2017, Mai 2017.

BALESTRA, C. E. T., PANSERA, W. A., REICHERT, T. A., SAVARI, G. **Evaluation of chloride ion penetration through concrete surface electrical resisitivity of field naturally desagred structures presente in marine environment,** Construction and Building Materials, v. 230, 116979, January 2020.

BALESTRA, C. E. T., NAKANO, A. Y.,SAVARIS, G., MEDEIROS-JUNIOR, R. A. **Reinforcement corrosion risk of marine concrete structures evaluated through electrical resistivity: Proposal of parameters based on field structures**, Ocean Engineering, v. 187, 106167, July 2019.

BARBOSA, M. B. PEREIRA, A. M., AKASAKI, J. L., FIORITI, C. F., FAZZAN, J. V., TASHIMA, M. M., BERNABEU, J. J. P., MELGES, J. L. P. **Impact strength and abrasion resistance of high strength concrete with rice husk ash and rubber tires**, Ibracon Structures and Materials Journal, v 6, p. 811-83, October, 2013.

BERENGUER, R. A.; CAPRARO, A. P. B.; MEDEIROS, M. H. F.; CARNEIRO, A. M. P.; OLIVEIRA, R. A. **Sugar cane bagasse ash as a partial substitute of Portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide**. Revista Journal of Environmental Chemical Engineering. V. 8, p. 1-7. Amsterdam, Países Baixo, 2020.

BERTOLINI, L., ELSENER, B., PEDEFERRI, P., POLDER, R., REDAELLI, E. **Corrosion of steel in concrete**. *Engineering Materials Science*, February 2004.

BIANCHINI, M. **Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2010.

BIXAPATHI, G. SARAVANAN, M. **Strength and durability of concrete using rice husk ash as a partial replacement of cement**. Materials Today: Proceedings. v 52, p. 1606-1610, 2022.

BUILD, N. 492, **Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments**. Nordtest method. 1999.

CHANDRASEKHAR, S., PRAMADA, P.N., MAJEED, J. **Effect of calcination temperature and heating rate on the optical properties and reactivity of rice husk ash**. J. Mater. Sci. 41 (23), p. 7926–7933, 2006.

CHRISTOPHER, F. BOLATITO, A., AHMED, S. **Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement- A review**.v.6, pp. 675-692, December, 2017.

CIMENTO ITAMBÉ LTDA. **Características dos cimentos**. Disponível em: www.cimentoitambe.com.br. Acesso em: abril de 2023.

COELHO, J. D. **Arroz: produção e mercado**. Caderno Setorial Etene. v. 156, 2021.

CORDEIRO, G. C., FILHO, R. D T., FAIRBAIRN, E. M. R. **Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto,** Ambiente Construído, v 9, n 4, p. 99-107, Dezembro, 2009.

CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., TAVARES, L. M., FARBAIRN, E. M. R. **Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars**, Cement & Concrete Composites, v. 30, p. 410–418, 2018.

CORDEIRO, G. C., FILHO, R. D. T., FAIRBAIRN, E. M. R. **Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto**, Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 99-107, out./dez. 2009.

DAMINELI, B. L., KEMEID, F. M., AGUIAR, P. S., JOHN, V. M. **Measuring the eco-efficiency of cement use**, Cement and Concrete Composites, v. 32, p. 555-562, September, 2010.

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Lower binder intensity eco-fficient concretes**. Eco-efficient Concrete, v.1, n.624, 2013.

DEJA, J., ULIASZ-BOCHENCZYK, A., MOKRZYCKI, E. **CO_2 emissions from Polish cement industry**, International Journal of Greenhouse Gas Control, v. 4, p. 583-588, 2010.

DELLA, V. P., I. KÜHN, D. HOTZA, **Rice husk ash as an alternate source for active silica production,** Mater. Lett., vol. 57, no. 4, p. 818–821, Dec 2002.

DOYLE, M. W.; HAVLICK, D. G. Infrastructure and the Environment. **Annual Review of Environment and Resources,** v. 34(1), p. 349-373, 2009.

EBENSPERGER, L., TORRENT, R. J. **Ensayo in-situ de Permeabilidad al Aire: ¿Un medidor de Durabilidad?** X Congresso Internacional sobre Patologia y Recuperación de Estructuras, CINPAR, 2014.

EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. **Dados de conjuntura da produção de arroz** *(Oryza sativa* **L***.)* **no Brasil (1985-2018): área, produção e rendimento.** Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, **2019**. Disponível em: http://www.cnpaf.embrapa.br/socioeconomia/index.htm. Acesso em: 22 set. 2023.

FARIAS, L. N. **Influência da composição do concreto e dos parâmetros de ensaio na resistividade elétrica obtida pelo método direto**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Estadual de Feira de Santana, 2020.

FELTRIN, C. S., ISAIA, G. C., LÜBECK, A. **Synergic effects between mineral admixtures on strength and microstructure of concretes**, Ibracon Structures and Materials Journal, v 13, n 6, March, 2020.

FENNIS, S. A. A. M. **Design of ecological concrete by particle packing optimization**. Janeiro, 2011.

FRANCO, L. C. **Concretos e argamassas sustentáveis aplicados à habitação de interesse social**. 2015, 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

GEIKER, M. R., HORNBOSTEL, K., LARSEN, C. L. **Relationship between concrete resistivity and corrosion rate- A literature review**, Cement and Concrete Composites, v. 39, p. 60-72. May 2013.

GHOSH, P.; TRAN, P. **Correlation between bulk and surfasse resistivity of concrete**. International Journal of Concrete Structures and Materials. V. 9, n.1, p. 119-132. Mar. 2015.

GODINHO, J. P., OLIVEIRA, R. L. N., CAPRARO, A. P. B., RÉUS, G. C., MEDEIROS, M. H. F. **Influência do formato dos corpos de prova e da idade de cura nas**

leituras de velocidade de ultrassom, resistividade elétrica e resistência à compressão axial, Simpósio Paranaense de patologia das construções, p. 116-129, 2018.

GURDIÁN, H., GARCÉS, P., ZORNOZA, E., GARCÍA ALCOCE, E. (2021), **Desempenho do concreto com adições pozolânicas e agregado reciclado**, Revista ALCONPAT, 11 (3), p. 17 – 30.

HATAMI, F., AMIRI, M. **Experimental study of mechanical properties and durability of green concrete containing slag, waste rubber powder and recycled aggregate with artificial neural network,** Cleaner Materials, v 5, 100112.

HELENE, P. R. do L.; MEDEIROS, M. H. F. **Estudo da influência do metacaulim HP como adição de alta eficiência em concretos de cimento portland**. Relatório Técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

HILLS, T., FLORIN, N., FENNELL, P. S. **Decarbonising the cement sector: A bottom-up model for optimising carbon capture application in the UK**, Journal of Cleaner Production, v. 139, 2016.

HINO JUNIOR, J. R., BALESTRA, C. E. T., MEDEIROS-JUNIOR, R. A. **Comparison of test methods to determine resistance to chloride penetration in concrete: Sensitivity to the effect of fly ash**, Construction and Building Materials, v 277, 122265, January, 2021.

HOPPE, T. F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; HELENE, P.; ISAIA, G. C. **High-volume fly ash concrete with and without hydrated lime: chloride diffusion coefficient from accelerated test**. Journal of materials in civil engineering, v. 25, n. 3, p. 411-418, 2013.

HUMPREYS, K.; MAHASENAN, M. Substudy 8: Climate Change, 2002. **Toward a Sustainable Cement Industry**, Disponível em: http://wbcsd.org, 2002.

HWANG, C. L.; CHANDRA, S. **The Use of Rice Husk Ash in Concrete**. In: CHANDRA, S. (Ed.). Waste Materials Used in Concrete Manufacturing. Delhi: Standard Publisher Distributors, 2002.

INDICADORES de Desenvolvimento Sustentável 2010. **In: IBGE. Sidra: sistema IBGE**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1191#resultado>.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Sistemas setoriais de inovação e infraestrutura de pesquisa no Brasil**. Brasília: Ipea, 2016.

JACOBS, F., HUNKELER, F. **Non destructive testing of the concrete cover – Evaluation of permeability test data**. International RILEM Workshop, Madrid, 2006.

JAUBERTHIE, R., RENDELL, F., TAMBA, S. CISSE, **Origin of the pozzolanic effect of rice husks,** Construction and Building Materials, 2000**.**

JOSA, A., AGUADO, A., CARDIM, A., BYARS, E. A**nálise comparativa da avaliação do impacto do ciclo de vida dos inventários de cimento disponíveis na UE**. Cement Concrete Research, v. 37, p. 781-788, Maio, 2007.

KAWABATA, C. Y., JUNIOR, H. S., COUTINHO- SOUSA, J. **Rice husk derived waste materials as partial cement replacement in lightweight concrete**, Ciênc. agrotec., Lavras, v. 36, n. 5, p. 567-578, set./out., 2012

KUBISSA, W., JASKULSKI, R., GRZELAK, M. **Torrent air permeability and sorptivity of concrete made with the use of air entraining agent and citric acid as setting retardant**, Construction and Building Materials, v. 268, 2021.

LEVY, S. M., HELENE, P. **Durability of recycled aggregates concrete:a safe way to sustainable development**, Cement and Concrete Research v. 34, 2004.

LIMA, C. J. F., RIBEIRO, F. R. C. R., MODOLO, R. C. E., ISAIA, G. C., MANCIO, M. **Durability, life cycle cost and life cycle assessment of binary mixtures with fly ash, rice husk ash and concrete demolition waste**, Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 22, n. 1, p. 161-166, jan./mar. 2021.

MACHADO, L. S. **Determinação da ecoeficiência de concretos reciclados em função do consumo de ligantes**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Estadual de Feira de Santana, 2020.

MALHOTRA, V. M**. Global Warming, and role of supplementary cementing materials and superplasticizers in reducing greenhouse gas emissions from the manufacturing of portland cement**. Proceedings of the 1st Panhellenic Conference on the Utilization of Industrial Byproducts in Construction, November, 2005.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. R. do L. **Migração de íons cloretos no concreto – Influência da consistência, relação água cimento e consumo de cimento**. Revista do IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, v. fev/mar, p. 53-66, 2003.

MEDEIROS, M. H. F. M., PEREIRA, E., FIGURA, A. S. TISSOT, F. M., ARTIOLI, K. A. **Avaliação da eficiência de sistemas de proteção de superfície para concreto: absorção de água, migração de cloretos e ângulo de contato**, v. 20 n.01, p. 145-159, 2015.

MEDEIROS, F. K., ANJOS, M. A. S., SÁ, M. V. .V. A., FARIAS, E. C., NASCIMENTO, R. F. **Concretos autoadensáveis com baixo consumo de cimento e incorporação da casca do arroz e metacaulim**, Revista Matéria, 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª Edição em Inglês. 1ª Edição em Português. Editora IBRACON. São Paulo, 2008.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A., Munhoz, G. S., Medeiros, M. H. F**. Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana**, 2019. Revista ALCONPAT, 9 (2), p. 152 – 162.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A., LIMA, M. G., BRITO, P. C., MEDEIROS, M. H. F. **Chloride penetration into concrete in an offshore platform-analysis of exposure conditions**, v 103, p. 78-87, 2015.

MEDEIROS, M. H. F., **Durabilidade e proteção do concreto armado**, Techne, v. 150, 2009.

MEDEIROS, M. H. F., ANDRADE, J. J. O., HELENE, P. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto**, Concreto: Ciência e Tecnologia, 2011.

MEDEIROS, M. H. F.; ARAÚJO, E. C.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. **Ecoeficiência do concreto considerando resistência à compressão, emissão de CO_2, resistividade elétrica e migração de cloretos**, 2019.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A., LIMA, M. G. **Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement**, Construction and Building Materials, v 107, p. 11-16, 2016.

MEDEIROS, M. H. F. **Estudo de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado**. Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho, v.12, Guimarães, 2001.

MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J.; HELENE, P. **Influence of the slice position on chloride migration tests for concrete in marine condition**. Marine Structures, v. 22, n. 2, p. 128-141, 2009.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A., LIMA, M. G., MEDEIROS, M. H. F., REAL, L.V. **Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento**, Revista ALCONPAT, v. 4, n.2, Mayo, p. 113-128, 2014.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A., LIMA, M. G. **Variação da resistividade elétrica do concreto com o formato de corpos de prova para diferentes tipos de cimento**, Revista de Engenharia e Tecnologia, v 7, n 1, Abril, 2015.

MENDES, S. E. S., OLIVEIRA, R. L. N., CREMONEZ, C., PEREIRA, E., PEREIRA, E., MEDEIROS-JUNIOR, R. A.. **Electrical resistivity as a durability parameter for concrete design: Experimental data versus estimation by mathematical model**, v 192, p. 610-620, 2018.

MEYER, C. **The greening of the concrete industry**, Cement & Concrete Composites, v. 31, p. 601-605, 2009.

MILLER, S.A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. **Readily implementable techniques can cut anual CO_2 emissions from the production of concrete by over 20%.** Environmental Research Letters, v.11, n. 7, 2016.

MIN-HONG, Z., MOHAN, M. **High-Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material**. ACI MATERIALS JOURNAL, 1996.

OLIVEIRA, V. C. H. C. et al. **Estratégias para a minimização da emissão de CO_2 de concretos**. Ambiente Construído, v. 14, n. 4, p. 167-181, 2014.

PARASTEGARI, N., MOSTOFINEJAD, D., POURSINA, D. **Use of bacteria to improve electrical resistivity and chloride penetration of air-entrained concrete**, Construction and Building Materials, v. 210, p. 588-595, June 2019.

PATIL, A., DWIVEDI, A. K. **Mechanical strength and durability performance of sea water concrete incorporating supplementary cementitious materials in different curing conditions**, Materials Today: Proceedings, v. 65, p. 969-974, 2022.

PATIL, S., PATEL, T. H., YASHODHA, E. **The effect of rice husk ash, silica fume, and quarry dust on glass fibre reinforced concrete's strength properties**, Materials Today: Proceedings, v. 59, p. 918-925, 2022.

POLDER, R.; ANDRADE, C.; ELSENER, B.; VENNESLAND, Ø.; GULIKERS, J.; WEIDERT, R.; RAUPACH, M. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, Vol. 33, p. 603-611, Dez 2000.

PROCEQ SA. **Resipod family – Operating instructions – Concrete durability testing**. Schwerzenbach: PROCEQ SA, 2017.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; PILVAR, A.; MAHDIKHANI, M.; MOODI, F. **Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength.** Construction and Building Materials, v. 25, n. 5, p. 2472–2479, 2011.

RAMEZANIANPOUR, A. A., MAHDI KHANI, A., AHMADIBENI, Gh. **The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes**. International Journal of Civil Engineerng. Vol. 7,, Junho, 2009.

REAL, L. V. **Efeito das adições pozolânicas na estimativa da vida útil do concreto exposto a cloretos através da resistividade elétrica superficial**. 2015, 167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

RIVAROLA, G. B. **Estudo comparativo de técnicas de mensurar a resistividade elétrica no concreto e sua relação com a durabilidade**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

ROBALO, K., COSTA, H., CARMO, R.. JULIO, E. **Experimental development of low cement content and recyclednconstruction and demolition waste aggregates concrete,** Construction and Building Materials, v. 273, 121680, 2021.

RODRIGUES, W., R. **Influência da resistividade elétrica na migração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento**. Dissertação (mestrado). Unidade

Acadêmica Especial de Engenharia da UFG. Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2023.

RODRIGUES, R.; GABOREAU, S.; GANCE, J.; IGNATIADIS, I.; BETELU, S. Reinforced concrete structures: **A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring**. Construction and Building Materials, v. 269, 2021.

SANDE, V. T., SADIQUE, M., PINEDA, P., BRAS, A., ATHERTON, W., RILEY, M. **Potential use of sugar cane bagasse ash as sand replacement for durable concrete**", Journal of Building Engineering, v. 39, p. 102207, July 2021.

SENTONE, D. T. **Desenvolvimento de método para medida de permeabilidade superficial de revestimento de argamassa**. Dissertação (mestrado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo, 2011.

SENGUL, O.; GJØRV, O. **Effect of Embedded Steel on Electrical Resistivity Measurements on Concrete Structures**. ACI Materials Journal, v. 106, n. 1, p. 11–18, 2009.

SHAFIGH, P., MAHMUD, H. B., JUMAAT, M.Z., ZARGAR, M. **Agricultural wastes as aggregate in concrete mixtures – A review**, Construction and Building Materials, v. 54, p. 110-117, 2014.

SHAHMANSOURI, A. A., BENGAR, H. A., JAHANI. E. **Predicting compressive strength and electrical resistivity of eco-friendly concrete containing natural zeolite via GEP algorithm**, Construction and Building Materials, v. 229, December 2019.

SHIMAKURA, S. E. **Interpretação do coeficiente de correlação**. Disponível em: www.est.ufpr.br, 2002.

SILVA, C. M. M. A., CAPUZZO, V. M. S. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto utilizando a abordagem de mistura dois estágios**. Revista Matéria, v 25, n 01, Setembro, 2019.

SNELLINGS, R., MERTENS, G., ELSEN, J**. Supplementary Cementitious Materials**. Reviews in Mineralogy & Geochemistry. Vol. 74, p. 211-278, 2012.

SNIC, 2019 – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: http://snic.org.br/RoadmapTecnologicodoCimento. Acesso em: 20 Out. 2019.

SOUZA, A. C. R. R. **Análise estatística da produção de cimento no Brasil e sua relação com o PIB da construção civil.** 2021, 78 p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Construções)- Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

SOLDADO, E., ANTUNES, A., COSTA, H. CARMO, R., JULIO, E.. **Durability of mortar matrices of low-cement concrete with specific additions**, *Construction and Building Materials*, v. 309, p. 125060, November 2021.

SCRIVENER, K. L., JOHN, V. M., GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry**. Cement and Concrete Research, v. 114, 2018.

SUGANDHINI, H. K., SHRIRAKSHA, SIVADAS, N., NAYAK, G., SHETTY, K. K. **A review on concrete's durability in India – Framework for performance-based approach**, Materials Today: Proceedings, v 60, p. 545-551, February, 2022.

SPRAGG, R. P.; CASTRO, J.; NANTUNG, T.; PAREDES, M.; WEISS, J. **Variability Analysis of the Bulk Resistivity Measured Using Concrete Cylinders.** Publication FHWA/IN/JTRP-2011/21. West Lafayette: Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, 2011.

TERUZZI, T., **Estimating the service-life of concrete structures subjected to carbonation on the basis of the air permeability of the concrete cover**. EUROINFRA, Helsinki, Oct.14-15, 2009

VASCONCELOS, A. R. B., AKASAKI, J. L. **Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu**. Ambiente Construído, v. 10, n 1, p. 77-90, 2010.

VENNESLAND, O., RAUPACH, M., ANDRADE, C. **Recommendation of Rilem TC 154-EMC: ''Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete''— measurements with embedded probes***, RILEM TECHNICAL COMMITTEE, 2007.

VOIGT, C. V. **Desempenho mecânico e durabilidade de concretos reforçados com fibras frente ao ataque por sulfato externo**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD), **Cement Industry Energy and CO_2 Performance- Getting the Numbers Right (GNR)**, 2016. Disponível em https://www.wbcsd.org/. Acesso em: 22 set. 2023.

WOSNIACK, L. M., REAL, L. V., SILVA, M. D., MACIOSKI, G., FILHO, J. H., MEDEIROS, M. H. F. **Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos**, *Ambiente Construído*, v. 21, p. 321-340, Julho/ Setembro 2021.

YILDIRIM, H., ILICA, T., SENGUL, O. **Effect of cement type on the resistance of concrete Against chloride penetration. Construction and Building Materials**, p. 1282-1288, 2011.