

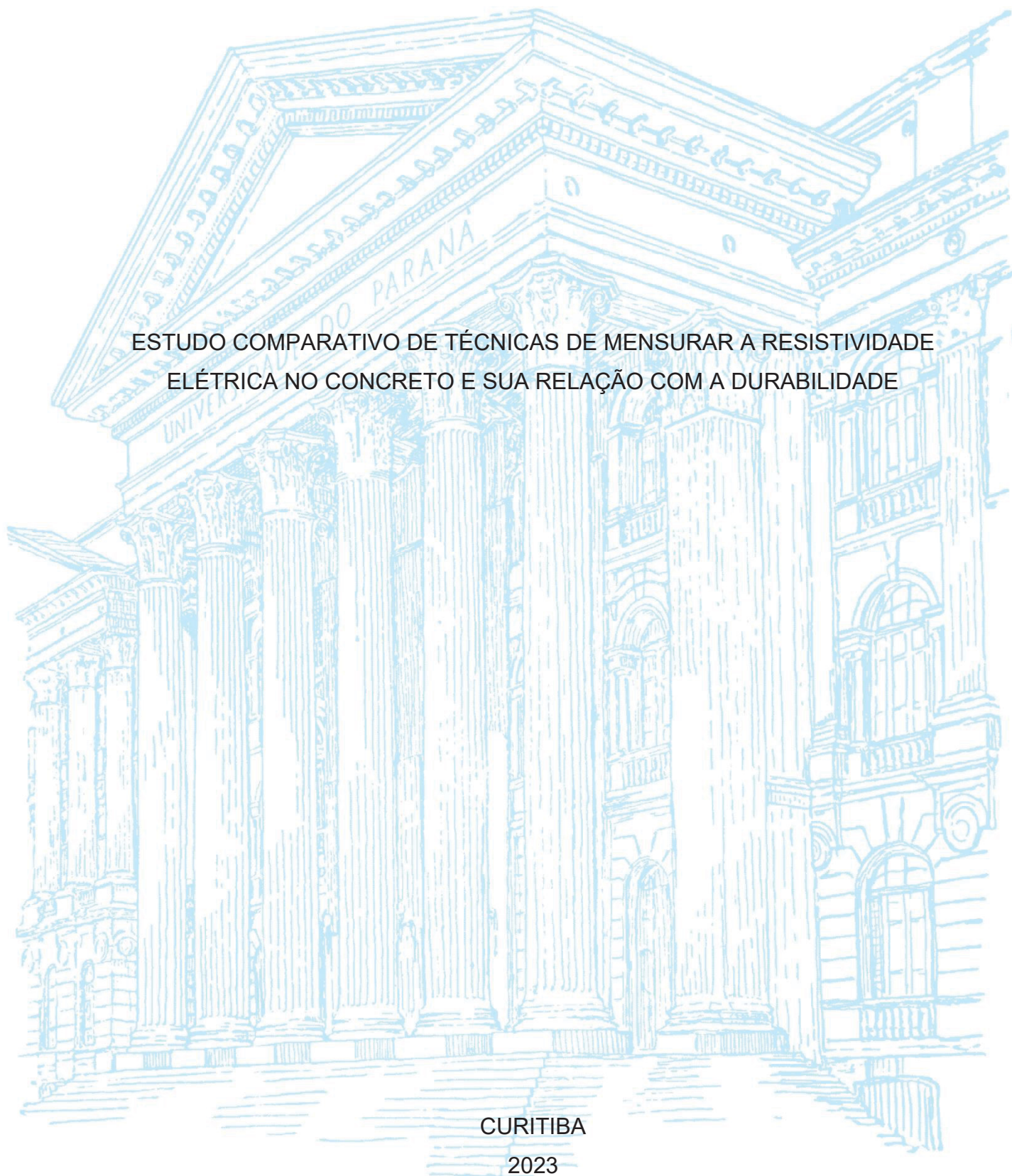
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GUSTAVO BORTOLAN RIVAROLA

ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE MENSURAR A RESISTIVIDADE
ELÉTRICA NO CONCRETO E SUA RELAÇÃO COM A DURABILIDADE

CURITIBA

2023



GUSTAVO BORTOLAN RIVAROLA

ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE MENSURAR A RESISTIVIDADE
ELÉTRICA NO CONCRETO E SUA RELAÇÃO COM A 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

2023

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

Rivarola, Gustavo Bortolan

Estudo comparativo de técnicas de mensurar a resistividade elétrica no concreto e sua relação com a durabilidade / Gustavo Bortolan Rivarola. – Curitiba, 2023.

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 - Durabilidade. 2. Cloretos – Permeabilidade. 3. Concreto – Testes. 4. Cimento. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Medeiros, Marcelo Henrique Farias de. IV. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL
40001016049P2

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 **GUSTAVO BORTOLAN RIVAROLA** intitulada: **ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE MENSURAR A RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO CONCRETO E SUA RELAÇÃO COM A DURABILIDADE**, sob orientação do Prof. Dr. MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre 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, 23 de Junho de 2023.

Assinatura Eletrônica
27/06/2023 17:10:34.0
MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
26/06/2023 13:15:14.0
VALMIR DE OLIVEIRA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
26/06/2023 19:44:45.0
CÉZAR AUGUSTO CASAGRANDE
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
26/06/2023 13:15:14.0
RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico este trabalho às crianças; e Viva Santo Antônio, São João, São Pedro e São Paulo!

AGRADECIMENTOS

Com gratidão e carinho especial aos meus pais; João Morel (in memoriam) que na sua simplicidade, brilhava com a luz da gentileza e da generosidade, e Terezinha Bortolan, que até hoje inspira valores de disciplina e dedicação. À minha família, meus alagoanos: “Dona Ivany”, “Little Man”, “Big-boy” e “Baby”, por me mostrarem o amor como nunca percebi antes. Aos meus compadres e comadres: Rogério, Nicolas e Vivian, porque, com amor e inspiração, me convenceram que seria possível e me mostraram o caminh; Emerson e Giselli, Jaiderson e Emilly, Peter e Ruth, obrigado por não desistirem de mim. Aos amigos pessoais dos vinte anos, do NPOR 95, do montanhismo, da nataçã, das jantas das quintas, do “trecho”, ao Jan Leduc e ao Nelson Margenet, pelo apoio moral e compreensão das minhas faltas.

Ao Prof. Dr. Marcelo H. F. de Medeiros, pela orientação, inspiração, confiança e paciência. Aos membros da banca, Prof. Dr. Ronaldo A. de Medeiros Junior, Prof. Dr. Valmir Oliveira e Prof. Dr. César A. Casagrande, por terem aceitado o convite e pelo feedback. Ao Prof. Dr. Ricardo Pieralisi, ao Prof. Juarez Hoppe Filho, aos técnicos de laboratório Vivianne, César e Felipe, pela ajuda na etapa experimental. Aos colegas Eduarda Lauck, Caio Voigt, Lorena dos Santos, Emanuel Cunha, Gabriela Mazureki, meu chará Gustavo Macioski pelo companheirismo e pela força.

Agradeço às instituições públicas: Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Centro de Estudos em Engenharia Civil (CESEC) e Universidade Federal do Paraná (UFPR), pela disponibilização de ensino de pós-graduação gratuito e de ótima qualidade; CAPES, pela bolsa de estudos; Fundação Araucária (FA) pela aquisição do aparelho de RES, Agência Nacional de Águas (ANA) pela manutenção do equipamento de RES, Laboratório de Materiais e Estruturas (LaME), Departamento de Construção Civil (DCC-UFPR), pela infraestrutura, pessoal e equipamentos disponibilizados; Instituto Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR-UFPR), pelos ensaios FRX; Laboratório Multiusuário de Fotônica, UTFPR-CT; Laboratório de Prensas da Área de Materiais de Construção Civil, DACOC-CT, UTFPR-CT. À GCP Applied Technologies e à Itambé pelos materiais doados usados no programa experimental. Ao Lactec, pelos ensaios de resistência à compressão simples. À Transpetris, pelo transporte emergencial de materiais.

Com carinho e sinceridade expresso minha gratidão a todos os que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização dessa pesquisa.

“Havia balões no ar, xote, baião no salão e no terreiro o teu olhar,
que incendiou meu coração!”

José Fernandes e Luiz Gonzaga (1951)

RESUMO

A resistividade elétrica é uma propriedade intrínseca do material que determina sua capacidade de resistir a condução da eletricidade através do seu corpo. No concreto, sem a presença de armaduras e agregados condutivos, a eletricidade é conduzida pela solução aquosa presente em sua rede de poros. Assim, a resistividade elétrica do concreto reflete sua condição de saturação, conectividade, distribuição e tamanho dos seus poros. Tal fato permite que sejam tomadas conclusões relativas à velocidade de penetração de agentes agressivos externos, bem como à velocidade de corrosão de armaduras. Três técnicas para medição de resistividade elétrica no concreto foram correlacionadas nesse trabalho: o método de Wenner, o método direto e o método da resistividade volumétrica extraída do RCPT. Impactos do uso dos materiais cimentícios suplementares (MCS) ativos e inertes foram comparados a um traço de referência, são eles: metacaulim, sílica de casca de arroz, cinza volante (MCS ativos); e fíler calcário (MCS inerte). O traço de referência foi composto de cimento tipo CP V-ARI, com agregados de origem natural, com fator água/aglomerante igual a 0,41. O metacaulim e a sílica de casca de arroz foram usados com um teor de 10% de substituição de cimento, em massa; a cinza volante, com 25%. Utilizou-se cimento tipo CP II-F, que contém de 11% a 25% de fíler calcário em sua composição, para se investigar o impacto desse MCS. A resistividade elétrica foi correlacionada a parâmetros comumente associados à durabilidade do concreto, tais como: resistência à compressão, resistência à penetração de cloretos, absorção de água por imersão e por capilaridade. Utilizando-se das médias de resistividade por amostra, identificaram-se correlações com $R^2 > 0,94$ entre os métodos de medição. O método de Wenner e o método direto são correlacionados pelo valor teórico da constante de correção de célula, ou fator de forma, proposto pela norma UNE 83988-2:2014, em corpos de prova saturados. Cada MCS tem impacto diferente sobre a resistividade elétrica, porém sua influência decorre da reação pozolânica, que contribui com a densificação da matriz cimentícia e altera a disponibilidade de íons condutivos na solução aquosa presente nos poros. O uso de fíler calcário proporcionou efeitos negativos à mitigação do risco de corrosão de armaduras por ataque de íons cloreto e favorecimento de maior penetrabilidade desses íons. Por outro lado, o uso de metacaulim, de sílica ativa, ou de cinza volante, surte efeitos positivos. Observou-se incremento dos valores de resistividade elétrica no decorrer do progresso de hidratação do cimento. Esse comportamento pode ser atribuído à: redução da quantidade de solução aquosa disponível nos poros, em decorrência do progresso de hidratação; ao efeito fíler e à alteração da composição química da solução aquosa presente nos poros, decorrentes da reação pozolânica. Foram encontradas correlações com $R^2 > 0,70$ entre a resistividade elétrica e a resistência à compressão.

Palavras chave: Métodos para medição de resistividade elétrica no concreto. Resistividade volumétrica extraída do RCPT. Materiais cimentícios suplementares. Resistência à penetração de cloretos. Parâmetros de durabilidade.

ABSTRACT

Electrical resistivity is an intrinsic property of the material that determines its ability to resist the conduction of electricity through its body. In concrete without the presence of rebar or either conductive aggregates, electricity is conducted by the aqueous solution present in its pore network. Thus, the electrical resistivity of concrete reflects its condition of saturation, connectivity, distribution and size of its pores. This fact allows conclusions to be drawn regarding the penetration speed of external aggressive agents, as well as the corrosion speed of reinforcement bars. Three techniques for measuring electrical resistivity in concrete were correlated in this work: the Wenner method, the direct method and the volumetric resistivity method extracted from the RCPT. Impacts of the use of active and inert supplementary cementitious materials (SCM) were compared to a reference mix, namely: metakaolin, rice husk silica, fly ash (active SCM); and limestone filler (inert SCM). The reference mix was composed of cement type CP V-ARI, with sand and gravel of natural origin, with a water/binder factor equal to 0.41. Metakaolin and rice husk silica were used with a cement replacement content of 10%, by mass – fly ash, with 25%. Type CP II-F cement, containing 11% to 25% of limestone filler in its composition, was used to investigate the effects of this SCM. Electrical resistivity was correlated with parameters commonly associated with concrete durability, such as: compressive strength, chloride ion penetration resistance, water absorption by immersion and by capillarity.suction. Using the mean resistivity per sample, correlations with $R^2 > 0.94$ were identified between the measurement methods. The theoretical value of the cell correction constant, or the shape factor, correlates the Wenner method to the direct method as proposed UNE 83988-2:2014 standard, in saturated specimens. Each SCM has different effect on resistivity, its influence derives from the pozzolanic reaction, which contributes to the densification of the cementitious matrix and changes the availability of conductive ions in pore solution. The use of limestone filler had negative effects, being harmful in terms of mitigating corrosion risk by chloride ion attack. Limestone filler showed to be favorable to greater penetrability of chloride ions. On the other hand, the use of metakaolin, rice husk ash, and also fly ash has presented positive effects. Electrical resistivity values increased alongside the progress of cement hydration. This behavior can be attributed to: reduction in the amount of pore solution available in the pores, as a result of hydration progress; to the filler effect and changes in the chemical composition of the pore solution, resulting from the pozzolanic reaction. Correlations with $R^2 > 0.70$ were found between electrical resistivity and compressive strength.

Keywords: Concrete's electrical resistivity assessment methods. Bulk resistivity extracted from the RCPT test. Supplementary cementitious materials. Resistance to chloride penetration. Durability parameters.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA SEÇÃO DE CONCRETO ARMADO COM ARMADURAS EM PROCESSO DE CORROSÃO POR OXIDAÇÃO DO FERRO E REDUÇÃO DO OXIGÊNIO.....	33
FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO COMPORTAMENTO DE PARTÍCULAS ELETRICAMENTE CARREGADAS EM UMA SEÇÃO DE PASTA DE CIMENTO ENDURECIDA E SATURADA: a) SEM DISTÚRPIO; b) SOB AÇÃO DE UM CAMPO ELÉTRICO.....	34
FIGURA 3 – MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA PELO MÉTODO DIRETO.....	36
FIGURA 4 – CONSTANTE DA CÉLULA EM FUNÇÃO DAS DIMENSÕES DO CORPO DE FORMA E DISTANCIAMENTO ENTRE ELETRODOS.....	39
FIGURA 5 – PRESSÃO SOBRE OS ELETRODOS DE ACORDO COM ASTM C1876-19.....	41
FIGURA 6 – DIAGRAMA DO INTERVALO DIMENSIONAL DE SÓLIDOS E POROS EM UMA PASTA ENDURECIDA: a) ELEMENTOS PRESENTES NA PASTA; b) ESCALA COMPARATIVA.....	42
FIGURA 7 – PERMEABILIDADE DE MEIOS POROSOS: a) ALTA POROSIDADE E BAIXA PERMEABILIDADE; b) POROSO E ALTA PERMEABILIDADE; c) POROSO E IMPERMEÁVEL; d) BAIXA POROSIDADE E ALTA PERMEABILIDADE.....	43
FIGURA 8 – MEDIDOR DE REV: a) DISPOSITIVO <i>SMARTBOX™</i> , DE LEITURA DE RESISTIVIDADE; b) ESQUEMA CONCEITUAL DE FUNCIONAMENTO.....	45
FIGURA 9 – ESQUEMA CONCEITUAL DE DISPOSITIVO DE LEITURA DE RESISTIVIDADE.....	45
FIGURA 10 – DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO DE RES: a) FABRICANTE GIATEC; b) FABRICANTE PROCEQ.....	46
FIGURA 11 – ESQUEMA DO DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO E DO FUNCIONAMENTO DO TESTE DE RES PELO MÉTODO DE WENNER.....	50

FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA DO MÉTODO DE WENNER NA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA: a) $a = 2\text{ cm}$; b) $a = 4\text{ cm}$; c) $a = 5\text{ cm}$	52
FIGURA 13 – ESQUEMA CONCEITUAL DE FUNCIONAMENTO E MONTAGEM DO TESTE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA PELO MÉTODO DIRETO....	53
FIGURA 14 – COMPARAÇÃO ENTRE RES E REV EXTRAÍDA DO RCPT OBTIDAS DE DIVERSOS TRAÇOS.....	54
FIGURA 15 – CORRELAÇÃO ENTRE RES E RC DE CONCRETOS COM DIFERENTES RELAÇÕES ÁGUA/CIMENTO E DIFERENTES TEORES DE CINZA VOLANTE.....	56
FIGURA 16 – CORRELAÇÕES ENTRE RC E RES: a) MISTURAS SIMPLES; b) MISTURAS DE METACAUIM; c) TODAS AS MISTURAS.....	57
FIGURA 17 – CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E RES, PARA CONCRETOS DE CIMENTO CP III RS 40, SOB TRÊS DIFERENTES RELAÇÕES ÁGUA/CIMENTO, AOS 28 E 91 DIAS DE TEMPO DE CURA.....	58
FIGURA 18 – SIMULAÇÃO DE HIDRATAÇÃO.....	59
FIGURA 19 – EVOLUÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL EM FUNÇÃO DO TEMPO, PARA DOIS TIPOS DE CIMENTO.....	60
FIGURA 20 – CORRELAÇÕES ENTRE RES E PERMEABILIDADE A ÁGUA: a) CONCRETOS COMPOSTOS DE MCS CONVENCIONAIS; b) CONCRETOS COMPOSTOS DE MCS ALTERNATIVOS.....	61
FIGURA 21 – ABSORÇÃO INICIAL X CONDUTIVIDADE.....	62
FIGURA 22 – CORRELAÇÕES – ABSORÇÃO DE ÁGUA E RES: a) ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE; b) ABSORÇÃO POR IMERSÃO.....	63
FIGURA 23 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS: SIMULAÇÃO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE WENNER, DE MEDIÇÃO DE RES.....	65
FIGURA 24 – DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DE CORRENTE DO MÉTODO DE WENNER PELA SEÇÃO DE UM CP: a) $a = 2\text{ cm}$; b) $a = 3\text{ cm}$; c) $a = 5\text{ cm}$	65

FIGURA 25 – ÁBACO DE MORRIS: CONSTANTE DE CORREÇÃO DE CÉLULA, PARA O MÉTODO DE WENNER, EM FUNÇÃO DAS DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA E DO DISTANCIAMENTO DE ELETRODOS, PARA LEITURAS NA GERATRIZ DO CILINDRO DO CORPO DE PROVA.....	67
FIGURA 26 – CORRELAÇÃO ENTRE O MÉTODO DIRETO E O DE WENNER, PARA TRAÇOS COM SÍLICA ATIVA: a) AMOSTRAS COM IDADES DE CURA ENTRE SETE E 28 DIAS; b) AMOSTRAS COM IDADES DE CURA ENTRE 56 E 161 DIAS.....	68
FIGURA 27 – CORRELAÇÃO ENTRE O MÉTODO DIRETO E O DE WENNER.....	69
FIGURA 28 – GEOMETRIA, DIMENSÕES E PONTOS DE TOMADA DE LEITURA DE RES EM DIFERENTES CORPOS DE PROVA DE CONCRETO...	70
FIGURA 29 – FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	73
FIGURA 30 – DIFRATOGRAMAS DOS MCS: a) SÍLICA DE CASCA DE ARROZ; b) METACAULIM; c) CINZA VOLANTE.....	78
FIGURA 31 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS MIÚDO E GRAÚDO.....	79
FIGURA 32 – RESISTIVÍMETRO PARA MÉTODO DE WENNER: a) DURANTE UMA TOMADA DE LEITURA; b) ESTOJO E ACESSÓRIOS.....	82
FIGURA 33 – EXECUÇÃO DO MÉTODO DIRETO: a) CONFIGURAÇÃO PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DOS ELETRODOS; b) CONFIGURAÇÃO PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DO CORPO DE PROVA JUNTO COM OS ELETRODOS.....	83
FIGURA 34 – FUNCIONAMENTO DO RCPT: a) PERSPECTIVAÇÃO... EXPLODIDA DA CÉLULA; b) CORTE LONGITUDINAL DA CÉLULA.....	85
FIGURA 35 – PREPARAÇÃO DO TESTE RCPT: a) CORTE; b) PROTEÇÃO E IMPERMEABILIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE; c) SATURAÇÃO.....	85
FIGURA 36 – MONTAGEM DAS CÉLULAS DE TESTE DO RCPT.....	86
FIGURA 37 – EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA O ENSAIO RCPT.....	87
FIGURA 38 – FONTE DE TENSÃO UTILIZADA.....	92
FIGURA 39 – MULTIMETRO DIGITAL MEDIDOR DE TENSÃO OU DE CORRENTE ELÉTRICA.....	93

FIGURA 40 – POSICIONAMENTO DOS ELETRODOS EM CONTATO COM O CORPO DE PROVA COM INDICAÇÃO DOS COMPONENTES DO SUPORTE E ELETRODOS.....	93
FIGURA 41 – CORPO DE PROVA, COM ELETRODOS, MONTADOS NO SUPORTE.....	94
FIGURA 42 – MONTAGEM DO ELETRODO SOBRE O SUPORTE.....	95
FIGURA 43 – DIAGRAMA DE CIRCUITO DO MÉTODO DIRETO.....	96
FIGURA 44 – MÉTODO DIRETO: a) MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS ELETRODOS; b) MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CONJUNTO CORPO DE PROVA MAIS ELETRODOS.....	97
FIGURA 45 - RESISTORES DE PRECISÃO USADOS NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DAS LEITURAS.....	98
FIGURA 46 – RES MÉDIA, POR TRAÇO AO LONGO DO TEMPO.....	100
FIGURA 47 – REV MÉDIA, POR TRAÇO AO LONGO DO TEMPO.....	102
FIGURA 48 – REV MÉDIA EXTRAÍDA DO RCPT, POR TRAÇO AO LONGO DO TEMPO.....	104
FIGURA 49 – DISTINÇÃO ESTATÍSTICA ENTRE MÉTODOS POR TRAÇO: a) TR; b) TM; c) TF; d) TSCA; e) TCV.....	106
FIGURA 50 – SEMELHANÇA ENTRE MÉTODOS POR FAIXA DE VARIABILIDADE, POR TRAÇO: a) TR; b) TM; c) TF; d) TSCA; e) TCV.....	108
FIGURA 51 - CORRELAÇÃO: MÉTODO DE WENNER X MÉTODO DIRETO.....	110
FIGURA 52 - CORRELAÇÃO: MÉTODO DA REV EXTRAÍDA DO RCPT X MÉTODO DIRETO.....	111
FIGURA 53 – CORRELAÇÃO: REV EXTRAÍDA DO RCPT X MÉTODO DE WENNER.....	112
FIGURA 54 – REV EM RELAÇÃO À COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES E RISCO DE CORROSÃO.....	114
FIGURA 55 – PENETRABILIDADE DE ÍONS CLORETOS EM RELAÇÃO AO PROGRESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.....	116
FIGURA 56 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM RELAÇÃO AO PROGRESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.....	118

FIGURA 57 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO APÓS 154 DIAS DE CURA SUBMERSA.....	119
FIGURA 58 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE APÓS 154 DIAS DE CURA SUBMERSA.....	121
FIGURA 59 – CORRELAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E POR CAPILARIDADE.....	122
FIGURA 60 – CORRELAÇÃO: RC X REV, ENTRE TODAS AS AMOSTRAS.....	123
FIGURA 61 – CORRELAÇÃO: RC X REV, POR TIPO DE AGLOMERANTE: a) TR; b) TM; c) TSCA; d) TF; e) TCV.....	124
FIGURA 62 – CORRELAÇÃO: RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS X REV.....	125
FIGURA 63 – CORRELAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO DE ÁGUA X REV: a) POR IMERSÃO; b) POR CAPILARIDADE.....	127
FIGURA 64 – GRÁFICO DE FATORES TR: RC X TEMPO DE CURA (1).....	159
FIGURA 65 – GRÁFICO DE FATORES TR: RC X TEMPO DE CURA (2).....	161
FIGURA 66 – GRÁFICO DE FATORES TM: RC X TEMPO DE CURA (1).....	163
FIGURA 67 – GRÁFICO DE FATORES TM: RC X TEMPO DE CURA (2).....	165
FIGURA 68 – GRÁFICO DE FATORES TF: RC X TEMPO DE CURA.....	167
FIGURA 69 – GRÁFICO DE FATORES TSCA: RC X TEMPO DE CURA (1).....	168
FIGURA 70 – GRÁFICO DE FATORES TSCA: RC X TEMPO DE CURA.....	169
FIGURA 71 – GRÁFICO DE FATORES TCV: RC X TEMPO DE CURA.....	172
FIGURA 72 – GRÁFICO DE FATORES 7 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	174
FIGURA 73 – GRÁFICO DE FATORES 28 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	174
FIGURA 74 – GRÁFICO DE FATORES 56 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	175
FIGURA 75 – GRÁFICO DE FATORES 91 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	177
FIGURA 76 – GRÁFICO DE FATORES 154 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	178

FIGURA 77 – GRÁFICO DE FATORES: RES X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (1).....	200
FIGURA 78 – GRÁFICO DE FATORES: REV X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (1).....	218
FIGURA 79 – GRÁFICO DE FATORES: RCPT X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (1).....	238
FIGURA 80 – GRÁFICO DE FATORES: REV EXTRAÍDA DO RCPT X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (1).....	244
FIGURA 81 – GRÁFICO DE FATORES: ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TR).....	253
FIGURA 82 – GRÁFICO DE FATORES: ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TM).....	256
FIGURA 83 – GRÁFICO DE FATORES: ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TF).....	259
FIGURA 84 – GRÁFICO DE FATORES: ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TSÇA).....	262
FIGURA 85 – GRÁFICO DE FATORES: ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TCV).....	265
FIGURA 86 – GRÁFICO DE FATORES: ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	268
FIGURA 87 – PERFIS DE ASCENÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE, POR TRAÇO: a) TR; b) TF; c) TSÇA; d) TCV; e TM.....	269

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – TRAÇO ABSOLUTO.....	141
QUADRO 2 – TRAÇO UNITÁRIO.....	141
QUADRO 3 – ENSAIOS REALIZADOS E AGRUPAMENTO DAS AMOSTRAS...	141
QUADRO 4 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ELIMINAÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS.....	151
QUADRO 5 – ANOVA RC: CASO TR E TRB.....	157
QUADRO 6 – LIMITE DE DECISÃO: RC NO CASO TR E TRB.....	157
QUADRO 7 – ANOVA TR: RC X TEMPO DE CURA (1).....	158
QUADRO 8 – LIMITE DE DECISÃO TR: RC X TEMPO DE CURA (1).....	159
QUADRO 9 – ANOVA TR: RC X TEMPO DE CURA (2).....	162
QUADRO 10 – LIMITE DE DECISÃO TR: RC X TEMPO DE CURA (2).....	161
QUADRO 11 – ANOVA RC: CASO TM E TMB.....	162
QUADRO 12 – LIMITE DE DECISÃO: RC no caso TM e TMB.....	162
QUADRO 13 – ANOVA TM: RC X TEMPO DE CURA (1).....	163
QUADRO 14 – LIMITE DE DECISÃO TM: RC X TEMPO DE CURA (1).....	164
QUADRO 15 – ANOVA TM: RC X TEMPO DE CURA (2).....	164
QUADRO 16 – LIMITE DE DECISÃO TM: RC X TEMPO DE CURA (2).....	165
QUADRO 17 – ANOVA TF: RC X TEMPO DE CURA.....	166
QUADRO 18 – LIMITE DE DECISÃO TF: RC X TEMPO DE CURA.....	167
QUADRO 19 – ANOVA TSCA: RC X TEMPO DE CURA (1).....	167
QUADRO 20 – LIMITE DE DECISÃO TSCA: RC X TEMPO DE CURA (1).....	168
QUADRO 21 – ANOVA TSCA: RC X TEMPO DE CURA.....	169
QUADRO 22 – LIMITE DE DECISÃO TSCA: RC X TEMPO DE CURA.....	170
QUADRO 23 – ANOVA TCV: RC X TEMPO DE CURA.....	170
QUADRO 24 – LIMITE DE DECISÃO TCV: RC X TEMPO DE CURA.....	171
QUADRO 25 – ANOVA 7 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	172
QUADRO 26 – LIMITE DE DECISÃO 7 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	173

QUADRO 27 – ANOVA 28 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	173
QUADRO 28 – LIMITE DE DECISÃO 28 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	174
QUADRO 29 – ANOVA 56 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DO CONCRETO.....	175
QUADRO 30 – LIMITE DE DECISÃO 56 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	176
QUADRO 31 – ANOVA 91 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DO CONCRETO.....	176
QUADRO 32 – LIMITE DE DECISÃO TM: RC X TEMPO DE CURA (A).....	177
QUADRO 33 – ANOVA 154 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DO CONCRETO.....	178
QUADRO 34 – LIMITE DE DECISÃO TM: RC X TEMPO DE CURA (A).....	179
QUADRO 35 – LEITURAS DE RES POR CP.....	180
QUADRO 36 – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DAS LEITURAS DE RES, POR CP.....	188
QUADRO 37 – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DA RES, POR TRAÇO.....	196
QUADRO 38 – RES: APLICAÇÃO DO FATOR DE FORMA E TRANSFORMAÇÃO DE UNIDADES.....	197
QUADRO 39 – TWO-WAY ANOVA RES: DADOS (1).....	199
QUADRO 40 – TWO-WAY ANOVA RES (1).....	200
QUADRO 41 – LIMITE DE DECISÃO: RES X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	201
QUADRO 42 – TWO-WAY ANOVA RES: DADOS (2).....	202
QUADRO 43 – TWO-WAY ANOVA RES (2).....	203
QUADRO 44 – LIMITE DE DECISÃO: RES X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	203
QUADRO 45 – LEITURAS DE REV POR CP.....	206
QUADRO 46 – TRATAMENTO ESTATÍSTICO REV, POR TRAÇO.....	215
QUADRO 47 – TWO-WAY ANOVA REV: DADOS (1).....	217
QUADRO 48 – TWO-WAY ANOVA REV (1).....	218
QUADRO 49 – LIMITE DE DECISÃO: RES X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	219

QUADRO 50 – TWO-WAY ANOVA REV: DADOS (2).....	220
QUADRO 51 – TWO-WAY ANOVA REV (2).....	221
QUADRO 52 – LIMITE DE DECISÃO: REV X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	221
QUADRO 53 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS: LEITURAS.....	224
QUADRO 54 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS APÓS ELIMINAÇÃO DE ELEMENTOS ESPÚRIOS.....	236
QUADRO 55 – TWO-WAY ANOVA RCPT: DADOS (1).....	237
QUADRO 56 – TWO-WAY ANOVA RCPT (1).....	238
QUADRO 57 – LIMITE DE DECISÃO: RCPT X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (1).....	239
QUADRO 58 – TWO-WAY ANOVA RCPT: DADOS (2).....	240
QUADRO 59 – TWO-WAY ANOVA RCPT (2).....	241
QUADRO 60 – LIMITE DE DECISÃO: RCPT X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (2).....	241
QUADRO 61 – REV A PARTIR DO RCPT, APÓS ELIMINAÇÃO DE ELEMENTOS ESPÚRIOS.....	243
QUADRO 62 – TWO-WAY ANOVA REV EXTRAÍDA DO RCPT: DADOS (1).....	244
QUADRO 63 – TWO-WAY ANOVA REV EXTRAÍDA DO RCPT (1).....	245
QUADRO 64 – LIMITE DE DECISÃO: REV EXTRAÍDA DO RCPT X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (1).....	246
QUADRO 65 – TWO- WAY ANOVA REV EXTRAÍDA DO RCPT: DADOS (2).....	247
QUADRO 66 – TWO-WAY ANOVA REV EXTRAÍDA DO RCPT (2).....	248
QUADRO 67 – LIMITE DE DECISÃO: REV EXTRAÍDA DO RCPT X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (2).....	248
QUADRO 68 - ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: DADOS TRAÇO TR.....	251
QUADRO 69 – TABELA ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: TRAÇO TR.....	252
QUADRO 70 – TESTE DE TUKEY: CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TR).....	253

QUADRO 71 – ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: DADOS TRAÇO TM.....	254
QUADRO 72 – TABELA ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: TRAÇO TM.....	255
QUADRO 73 – TESTE DE TUKEY: CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TM).....	256
QUADRO 74 - ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: DADOS TRAÇO TF.....	257
QUADRO 75 – TABELA ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: TRAÇO TF.....	258
QUADRO 76 – TESTE DE TUKEY: CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TF).....	259
QUADRO 77 - ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: DADOS TRAÇO TSCA.....	260
QUADRO 78 – TABELA ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: TRAÇO TSCA.....	261
QUADRO 79 – TESTE DE TUKEY: CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TSCA).....	262
QUADRO 80 – ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: DADOS TRAÇO TCV.....	263
QUADRO 81 – TABELA ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: TRAÇO TCV.....	264
QUADRO 82 – TESTE DE TUKEY: CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TCV).....	265
QUADRO 83 – ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE – IDENTIFICAÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS.....	266
QUADRO 84 – ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE APÓS ELIMINAÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS.....	267
QUADRO 85 – ANOVA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE.....	267
QUADRO 86 – LIMITE DE DECISÃO: ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	268

QUADRO 87 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO: MASSA DOS CORPOS DE PROVA.....	270
QUADRO 88 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO.....	270
QUADRO 89 – ANOVA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO.....	270
QUADRO 90 – LIMITE DE DECISÃO: ABSORÇÃO POR DE ÁGUA POR IMERSÃO X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	271

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	CONSTANTES DE CORREÇÃO DE CÉLULA, COM $a = 50$ MM, PROPOSTOS POR ARAÚJO, MACIOSKI E MEDEIROS (2022).....	38
TABELA 2 –	FREQUÊNCIA DE CORRENTE ELÉTRICA PARA MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO CONCRETO, SEGUNDO ALGUNS AUTORES.....	40
TABELA 3 -	DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO, DISPONÍVEIS NO MERCADO INTERNACIONAL.....	44
TABELA 4 –	FAIXAS DE RISCO DE CORROSÃO DE ARMADURAS EM FUNÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA, SEGUNDO DIFERENTES AUTORES.....	47
TABELA 5 –	PENETRABILIDADE DE CLORETOS EM FUNÇÃO DA CARGA ACUMULADA NO RCPT (ASTM C1202-19).....	49
TABELA 6 –	RESULTADOS DE RC E RES DE CONCRETOS COM DIFERENTES RELAÇÕES ÁGUA/CIMENTO E DIFERENTES TEORES DE CINZA VOLANTE.....	55
TABELA 7 –	CONSTANTE DE CORREÇÃO DE CÉLULA DE ACORDO COM A NORMA AENOR UNE 83988-2:2014 E COM ARAÚJO, MACIOSKI E MEDEIROS (2023).....	70
TABELA 8 –	VARIABILIDADE MÉDIA E ÍNDICE DE PRECISÃO DO MÉTODO DIRETO.....	71
TABELA 9 –	VARIABILIDADE DE VARIABILIDADE DE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO CONCRETO.....	72
TABELA 10 –	PROPORÇÕES DE MISTURA UNITÁRIAS.....	75
TABELA 11 –	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS CIMENTOS.....	76
TABELA 12 –	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS CIMENTOS.....	76
TABELA 13 –	ANÁLISE QUÍMICA DOS MCS POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X.....	77
TABELA 14 –	ATIVIDADE POZOLÂNICA PELO MÉTODO CHAPELLE MODIFICADO.....	77
TABELA 15 –	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	79
TABELA 16 –	VARIÁVEIS INDEPENDENTES.....	80
TABELA 17 –	VARIÁVEIS DEPENDENTES.....	80

TABELA 18 – ENSAIOS UTILIZADOS NESTE EXPERIMENTO.....	81
TABELA 19 – TESTES DE VALIDADE.....	87
TABELA 20 – AGRUPAMENTO DE DADOS AMOSTRAIS PARA ANÁLISE DE RESULTADOS.....	89
TABELA 21 – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DADO EM FUNÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS.....	90
TABELA 22 – TRATAMENTO ESTATÍSTICO PARA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE MCS SOBRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	90
TABELA 23 – TRATAMENTO ESTATÍSTICO: EVOLUÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA COM O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO.....	91
TABELA 24 – COEFICIENTES DE VARIAÇÃO OBSERVADOS DENTRO DOS ENSAIOS, PARA AS AMOSTRAS TSCA91, TSCA154 E TF7.....	107
TABELA 25 – CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DO CONCRETO EM FUNÇÃO DA ABSORÇÃO POR IMERSÃO, CONFORME O CEB 192 (1989).....	120
TABELA 26 – COEFICIENTE ANGULAR DA LINHA DE CORRELAÇÃO REV X RC, POR TRAÇO.....	125
TABELA 27 – CORRELAÇÕES ENTRE OS MÉTODOS DIRETO, DE WENNER E DA REV EXTRAÍDA DO RCPT.....	128
TABELA 28 – COMPORTAMENTO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO EM RELAÇÃO AO TRAÇO DE REFERÊNCIA.....	129
TABELA 29 – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA.....	144
TABELA 30 – TESTE DE TUKEY RC: CASO TR E TRB.....	157
TABELA 31 – TESTE DE TUKEY TR: RC X TEMPO DE CURA (1).....	159
TABELA 32 – TESTE DE TUKEY: RC X TEMPO DE CURA (2).....	161
TABELA 33 – TESTE DE TUKEY RC: CASO TM E TMB.....	162
TABELA 34 – TESTE DE TUKEY TM: RC X TEMPO DE CURA (1).....	164
TABELA 35 – TESTE DE TUKEY: RC X TEMPO DE CURA (2).....	165
TABELA 36 – TESTE DE TUKEY TF: RC X TEMPO DE CURA.....	167
TABELA 37 – TESTE DE TUKEY TSCA: RC X TEMPO DE CURA (A).....	168
TABELA 38 – TESTE DE TUKEY TSCA: RC X TEMPO DE CURA.....	170
TABELA 39 – TESTE DE TUKEY TSCA: RC X TEMPO DE CURA.....	171
TABELA 40 – TESTE DE TUKEY 7 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	173

TABELA 41 – TESTE DE TUKEY 28 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	174
TABELA 42 – TESTE DE TUKEY 56 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	176
TABELA 43 – TESTE DE TUKEY 56 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	177
TABELA 44 – TESTE DE TUKEY 154 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	179
TABELA 45 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	179
TABELA 46 – TESTE DE TUKEY: RES DO TRAÇO TM.....	201
TABELA 47 – TESTE DE TUKEY: RES X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	203
TABELA 48 – TESTE DE TUKEY: RES X TEMPO DE CURA.....	204
TABELA 49 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL.....	205
TABELA 50 – TESTE DE TUKEY: REV DO TRAÇO TM.....	210
TABELA 51 – TESTE DE TUKEY: REV X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	221
TABELA 52 – TESTE DE TUKEY: REV X TEMPO DE CURA.....	222
TABELA 53 – RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA.....	223
TABELA 54 – TESTE DE TUKEY: RCPT, AO CASO DO TRAÇO TF.....	239
TABELA 55 – TESTE DE TUKEY: RCPT X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	241
TABELA 56 – TESTE DE TUKEY: RCPT X TEMPO DE CURA.....	242
TABELA 57 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS.....	243
TABELA 58 – TESTE DE TUKEY: REV EXTRAÍDA DO RCPT, AO CASO DO TRAÇO TM.....	246
TABELA 59 – TESTE DE TUKEY: REV EXTRAÍDA DO RCPT X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	248
TABELA 60 – TESTE DE TUKEY: REV EXTRAÍDA DO RCPT X TEMPO DE CURA.....	249
TABELA 61 – REV EXTRAÍDA DO RCPT.....	250
TABELA 62 – TESTE DE TUKEY: ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	269
TABELA 63 – TESTE DE TUKEY: ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES.....	271

LISTA DE SIGLAS ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ACI	–	Acrônimo em inglês para Instituto Americano do Concreto
ANOVA	–	Acrônimo em inglês para análise de variância
ASTM	–	Acrônimo em inglês para sociedade americana para testes e materiais
AASHTO	–	Acrônimo em inglês para associação americana de rodovias estaduais e dos funcionários do transporte
AENOR	–	Acrônimo em espanhol para associação espanhola de normatização e certificação
CP	–	Corpo de prova
CPs	–	Corpos de prova
CAPES	–	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CEB	–	Acrônimo em Francês para Comitê Europeu do Concreto
CESEC	–	Centro de Estudos de Engenharia Civil
C-S-H	–	Silicato de Cálcio Hidratado
<i>Et al.</i>	–	Abreviação do termo latino “ <i>et alii</i> ”, que significa “e outros”
EUA	–	Estados Unidos da América
LAME	–	Laboratório de Materiais e Estruturas
iLAMIR	–	Instituto Laboratório de Análise de Minerais e Rochas
MCS	–	Material cimentício suplementar
MEF	–	Método de elementos finitos
NBR	–	Norma técnica brasileira
p.	–	Página
R ²	–	Coeficiente de determinação
RC	–	Resistência à compressão
RCPT	–	Sigla em inglês para teste acelerado de permeabilidade a cloretos
RES	–	Resistividade elétrica superficial
REV	–	Resistividade volumétrica
RILEM	–	Acrônimo em Francês para União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais de Construção, Sistemas de Construção e Estruturas
TCV	–	Mistura composta de cinza volante
TF	–	Mistura composta de fíler calcário
TM	–	Mistura composta de metacaulim

- TR – Mistura composta de cimento tipo CP V-ARI, sem outras adições
- TSCA – Mistura composta de sílica de casca de arroz
- TM* – Marca registrada
- UFPR – Universidade Federal do Paraná
- UNE – Acrônimo em espanhol para uma norma espanhola
- UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	JUSTIFICATIVA	30
1.2	OBJETIVOS	31
1.2.1	Objetivo geral	31
1.2.2	Objetivos secundários	31
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1	RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO	33
2.1.1	Fatores influenciadores da resistividade elétrica do concreto	37
2.1.2	Correlações entre a resistividade elétrica do concreto e a durabilidade	41
2.1.3	Medidores de resistividade disponíveis no mercado	44
2.2	RISCO DE CORROSÃO DE ARMADURAS	46
2.3	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS	49
2.4	MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO CONCRETO	50
2.4.1	Método de Wenner	50
2.4.2	Método direto	52
2.4.3	Resistividade volumétrica extraída do RCPT	53
2.5	CORRELAÇÃO ENTRE RESISTIVIDADE ELÉTRICA E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	55
2.6	RELAÇÃO ENTRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA E A ESTRUTURA DE POROS DE PASTAS DE CIMENTO	58
2.7	CORRELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DIRETO E DE WENNER	64
2.7.1	RES aparente	64
2.7.2	Constante de correção de célula	66

2.7.3	Constante de correção de célula: correlação entre o método direto e o de Wenner.....	67
2.8	VARIABILIDADE DA RESISTIVIDADE DOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO.....	71
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	73
3.1	VARIÁVEIS DA PESQUISA E PARÂMETROS FIXADOS.....	74
3.1.1	Proporções de mistura.....	74
3.1.2	Caracterização dos cimentos.....	75
3.1.3	Caracterização dos materiais cimentícios suplementares.....	77
3.1.4	Caracterização dos agregados.....	79
3.1.5	Variáveis independentes e variáveis dependentes.....	80
3.2	PROTOCOLOS DE ENSAIOS.....	81
3.2.1	Procedimento de execução do método de Wenner.....	82
3.2.2	Procedimento de execução do método direto.....	83
3.2.3	Resistividade volumétrica extraída do RCPT.....	84
3.2.3.1	Descrição do RCPT.....	84
3.2.3.2	Cálculo da REV extraída do RCPT.....	86
3.3	TESTES DE VALIDADE E MODELO ESTATÍSTICO.....	87
3.3.1	Testes de validade.....	87
3.3.2	Modelo estatístico.....	88
3.4	MÉTODOS DE ANÁLISE DE RESULTADOS.....	89
3.4.1	Correlação entre diferentes técnicas de medição de resistividade elétrica.....	90
3.4.2	Efeito de adições de MCS sobre a resistividade elétrica do concreto.....	90
3.4.3	Evolução da resistividade elétrica com o processo de hidratação.....	90

3.4.4	Correlação da REV com outros parâmetros de durabilidade.....	91
3.5	CONSTRUÇÃO DO APARATO DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA.....	91
3.5.1	Equipamentos eletrônicos.....	92
3.5.2	Eletrodos e dispositivos de suporte.....	93
3.5.3	Diagrama de circuito elétrico.....	96
3.5.4	Configuração aparato de medição de REV.....	96
3.5.5	Calibração das leituras.....	98
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	99
4.1	MEDIÇÕES DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO.....	99
4.1.1	Resistividade elétrica superficial (RES).....	99
4.1.2	Resistividade volumétrica (REV).....	101
4.1.3	Resistividade volumétrica extraída do RCPT.....	103
4.2	CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO CONCRETO.....	105
4.2.1	Distinção estatística entre resultados de métodos de medição de resistividade elétrica.....	105
4.2.2	Semelhança entre métodos por faixas limite de variabilidade de resultados.....	107
4.2.3	Correlação determinada por regressão linear simples	109
4.2.3.1	Correlação entre o método de Wenner e o método direto.....	109
4.2.3.2	Correlação entre o método da REV extraída do RCPT e o método direto.....	111
4.2.3.3	Correlação entre o método da REV extraída do RCPT e o método de Wenner.....	113
4.3	EFEITO DA COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES SOBRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO.....	113
4.4	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS.....	115
4.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	117

4.6	ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 154 DIAS DE CURA SUBMERSA.....	119
4.6.1	Absorção de água por imersão.....	119
4.6.2	Absorção de água por capilaridade.....	120
4.6.3	Correlação entre absorção de água por imersão e por capilaridade após 154 dias de cura submersa.....	122
4.7	CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO E PARÂMETROS DE DURABILIDADE.....	123
4.7.1	Resistência à compressão e resistividade elétrica.....	123
4.7.2	Resistência à penetração de cloretos pelo RCPT e resistividade elétrica....	125
4.7.3	Resistividade elétrica e absorção de água por imersão e por capilaridade...	126
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	128
5.1	CONCLUSÕES.....	128
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	130
5.3	ARTIGOS PUBLICADOS, CURSOS MINISTRADOS E OUTRAS ATIVIDADES DE PESQUISA.....	130
	REFERÊNCIAS.....	132
	APÊNDICE 1 – AMOSTRAS.....	141
	APÊNDICE 2 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	151
	APÊNDICE 3 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL.....	180
	APÊNDICE 4 – RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA.....	206
	APÊNDICE 5 – RCPT E REV EXTRAÍDA DO RCPT.....	224
	APÊNDICE 6 – CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE NO CONCRETO.....	251
	APÊNDICE 7 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	266
	APÊNDICE 8 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO.....	270

1. INTRODUÇÃO

A resistividade elétrica é uma propriedade inerente dos materiais, inversamente proporcional a sua facilidade em transportar cargas elétricas (ANDRADE, 1993; KOLEVA, 2008; POLDER, 2000, 2001), independente da geometria da amostra (LAYSSI, 2015). No concreto, a resistividade elétrica pode variar de 10^6 Ohms metro (Ωm), em concretos secos em estufa, a $10 \Omega m$, em concretos saturados (WHITING, 2003 *apud* AZARSA; GUPTA, 2017). Isso confere à resistividade elétrica o título da grandeza de maior amplitude de valores entre as propriedades do concreto (HORNBOSTEL; LARSEN; GEIKER, 2013). Sua medida é facilmente obtida pela aplicação direta da lei de Ohm, seguida de uma constante da célula.

A popularidade das aplicações da resistividade elétrica do concreto é evidenciada de várias formas. No Brasil, na América do Norte e na Europa, diferentes métodos de medição de resistividade são normatizados (AASHTO T358:2019; ABNT NBR 9024:2012; AENOR UNE 83988-1:2008; AENOR UNE 83988-2:2014; ASTM C1876-19). Além disso, diferentes dispositivos são patenteados (ALIZADETH, 2020; HASEGAWA, 2013; KIM; LEE; MOON, 2017), fabricados em série e comercializados para medir a resistividade elétrica no concreto.

Dentre as diversas aplicações da resistividade elétrica, no campo da análise de materiais, diversos autores investigaram a influência de adições de materiais cimentícios suplementares (MCS) sobre a resistividade (ARAÚJO; MACIOSKI; MEDEIROS, 2022; MEDEIROS-JUNIOR; GANS, 2017; REAL, 2015). Wei, Xiao e Li (2012), bem como Dong *et al.* (2016), para fins de controle de qualidade, abordaram a correlação da resistividade elétrica de misturas de concreto fresco com sua resistência à compressão aos 28 dias. No campo de estudo de modelos de predição de vida útil, Andrade (2004) propôs um modelo que tem como principal parâmetro a resistividade elétrica superficial (RES) do concreto. Este modelo foi aplicado à obra da duplicação do canal do Panamá, que começou em 2011 (ANDRADE, 2013). Balestra *et al.* (2019) propuseram parâmetros de avaliação do risco de corrosão em função da resistividade elétrica a partir de observações em campo. Balestra *et al.* (2020), bem como, Konečný *et al.* (2021) correlacionaram a resistividade elétrica do concreto a perfis de cloreto e modelos de estimativa de vida útil.

Neste trabalho três métodos de medição de resistividade elétrica foram comparados, são eles: o método de Wenner, que mede a RES; o método direto, que mede a resistividade volumétrica (REV); e a REV extraída do RCPT (sigla em inglês para “teste de rápido de permeabilidade de cloretos”), que foi executado de acordo com a norma ASTM C1202-19. Este último teste, apesar ter sido desenvolvido para outro fim, permite que a resistividade elétrica seja calculada a partir de dados dele obtidos (ASTM C1202-19; HOPPE FILHO, 2013; KONEČNÝ, 2017; WOSNIACK, 2021).

Misturas com substituição parcial de cimento por MCS foram submetidos ao experimento. Neste contexto, tornou-se possível observar a influência dos MCS sobre a resistividade elétrica do concreto. Os MCS utilizados no programa experimental foram: metacaulim, sílica de casca de arroz, cinza volante e filler de calcário. A contribuição do trabalho também está em entender a relação da resistividade elétrica com a resistência à compressão; resistência à penetração de cloretos; porosidade e permeabilidade – grandezas estas, frequentemente relacionadas à durabilidade do concreto.

1.1 JUSTIFICATIVA

O estudo da resistividade elétrica do concreto é motivado por sua relação com a durabilidade, como parâmetro de avaliação e análise de propriedades relacionadas à condutibilidade de íons através da solução aquosa presente na microestrutura porosa do concreto. Tais propriedades eletroquímicas, estudadas há décadas, têm relação direta com a penetração de agentes agressivos associados à corrosão de armaduras do concreto armado. De acordo com Altoubat, Maalej e Shaikh (2016), bem como, Oh e Jang (2003), a corrosão de armaduras é uma das maiores causas de redução de vida útil e deterioração de estruturas de concreto, no mundo.

Por se tratar de uma grandeza física eletroquímica, há uma grande diversidade de fatores, alguns pouco compreendidos, que influenciam na resistividade elétrica do concreto e na sua tomada de leitura, portanto ainda precisam de intensa discussão e investigação (HORNBOSTEL; LARSEN; GEIKER, 2013). Newlands *et al.* (2008) relatam que há um grande coeficiente de variação entre diferentes métodos e procedimentos.

Dentre os métodos para medição de resistividade elétrica no concreto, o método de Wenner pode ser usado em campo e também em laboratório, de acordo com Polder (*et al.* 2000, 2001) – porém, os autores afirmam que o método direto é mais preciso.

Konečný *et al.* (2017) correlacionaram a resistividade obtida pelos métodos de Wenner e extraída do RCPT, em um tipo de concreto, com uma amostra composta de poucos corpos de prova. Wosniack *et al.* (2021) buscaram essa correlação, usando seis tipos de concreto, testados aos 28 dias. Spragg *et al.* (2011) buscaram a correlação entre o método direto, o de Wenner e o RCPT por meios experimentais e empíricos, com diversos tipos de concreto em idades de cura de 28 dias, 56 dias e 91 dias,.

Araújo, Macioski e Medeiros (2022) propõe novas constantes de correção de célula diferentes dos propostos pela norma AENOR 83988-2:2014. Essas constantes também correlacionam o método direto ao método de Wenner. Os autores encorajam novos estudos com MCS reativos, como a sílica de casca de arroz e a cinza volante.

Neste trabalho estudaram-se correlações experimentais entre os métodos de Wenner, direto e da REV extraída do RCPT, com cinco traços empregando MCS, sobre o intervalo temporal de sete dias, 28 dias, 56 dias, 91 dias e 154 dias de tempo de hidratação do cimento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo da presente pesquisa é produzir uma comparação sistemática entre três técnicas de medir a resistividade elétrica do concreto, elaborando uma avaliação crítica sobre a coincidência ou divergência de resultados encontrados, obtidos de cada um dos meios de medição.

1.2.2 Objetivos secundários

Os testes de resistividade foram executados sobre diferentes tipos de concreto, com alteração dos MCS, portanto pode-se afirmar que os objetivos secundários da pesquisa são:

- a) investigação do efeito dos MCS na resistividade elétrica do concreto;

- b) investigação do efeito dos MCS na resistência à penetração de cloretos;
- c) investigação do efeito dos MCS na absorção de água por imersão e por capilaridade;
- d) investigação da evolução da resistividade elétrica com o progresso de hidratação do cimento;
- e) buscar uma correlação entre a resistividade elétrica do concreto e as seguintes propriedades do concreto: resistência à compressão; resistência à penetração de cloretos; absorção de água por imersão e por capilaridade.

O sexto objetivo secundário se consistiu na construção e teste de um aparato de medição de REV.

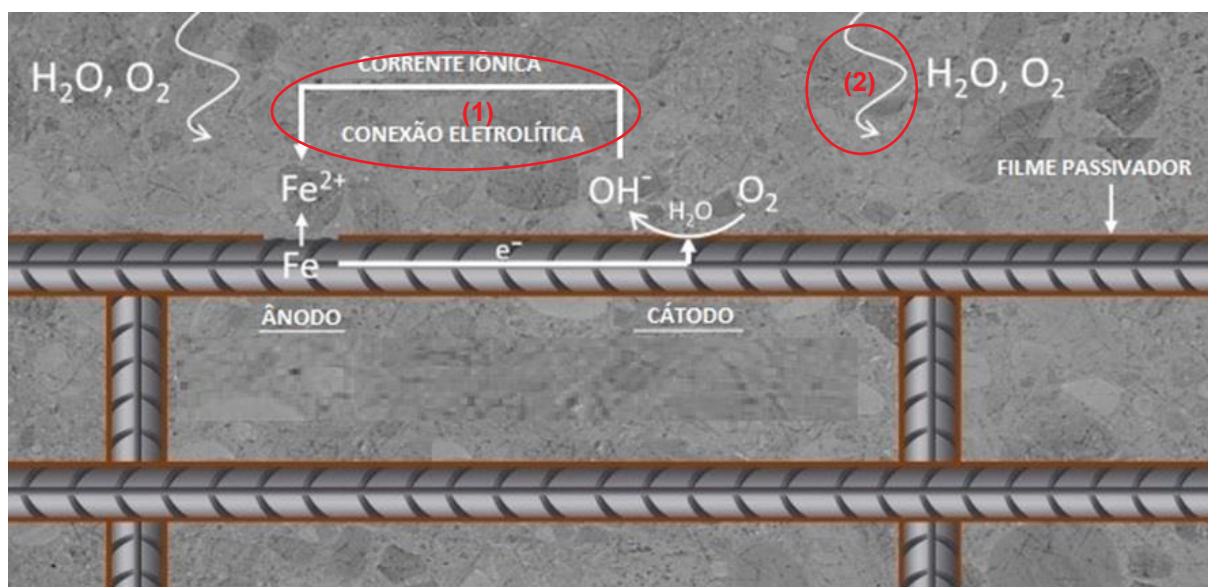
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

A resistividade elétrica tem uma relação inversa com o transporte de carga elétrica através de meios porosos. Para a norma AENOR UNE 83988-1:2008, bem como para Andrade (2004) e Monfore (1968 *apud* MEDEIROS-JUNIOR, 2014), a resistividade é uma indicação inversa da conectividade, tamanho e distribuição dos poros do concreto em condição saturada. Outrossim, a resistividade elétrica depende da estrutura de poros do concreto e, além disso, da composição química da solução neles presente, sendo influenciada pelo teor de umidade (BRAMESHUBER; RAUPACH, 2003) e temperatura do corpo de prova (POLDER, 2000, 2001; TOMLINSON, 2017). Por essa razão, a resistividade é comumente tomada como parâmetro de resistência à penetração de agentes agressivos no concreto (AASHTO T358:2019), e velocidade de corrosão de armaduras (ANDRADE, 2004).

A Figura 1 representa uma seção de concreto armado, na qual se interessa avaliar duas propriedades governadas pela resistividade elétrica do concreto, a saber: a intensidade de penetração de agentes agressivos e a velocidade de corrosão.

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA SEÇÃO DE CONCRETO ARMADO COM ARMADURAS EM PROCESSO DE CORROSÃO POR OXIDAÇÃO DO FERRO E REDUÇÃO DO OXIGÊNIO



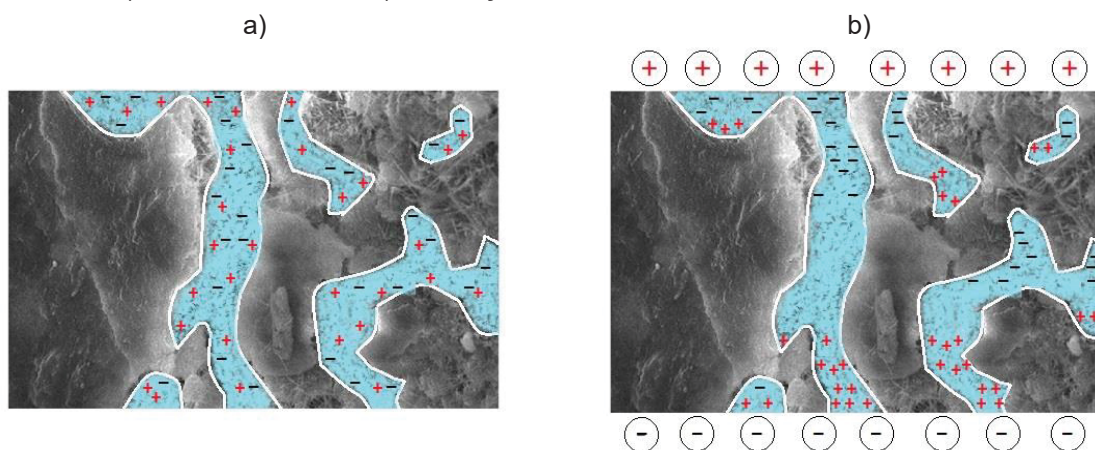
FONTE: Rodrigues *et al.* (2021).

Na Figura 1, a armadura encontra-se despассивada na região anódica, em corrosão – destacam-se: (1) o fluxo da corrente elétrica entre a área anódica e

catódica; (2) o transporte de água e gases provenientes do meio externo através dos poros do concreto. No destaque (1), o concreto funciona como eletrólito – neste caso, um concreto menos resistivo irá determinar maior velocidade de corrosão. No destaque (2), a conectividade, tamanho e distribuição dos poros irá determinar a penetrabilidade da água e gases no concreto, consequentemente, um concreto menos resistivo facilitará a entrada de agentes agressivos à armadura.

Durante um teste de resistividade elétrica do concreto, a fase sólida da pasta de cimento, atua como isolante elétrico, enquanto a eletricidade é conduzida pela solução aquosa presente nos poros. Quando o concreto não está saturado, a corrente percorre o filme aquoso adsorvido nas paredes dos poros. Quando seco, o concreto atua como isolante elétrico (BRAMESHUBER; RAUPACH, 2003). A Figura 2 representa uma seção de uma pasta de cimento endurecida, saturada, em duas situações: a) sem perturbação; e b) sob ação de um campo elétrico, com decorrente movimentação iônica.

FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO COMPORTAMENTO DE PARTÍCULAS ELETRICAMENTE CARREGADAS EM UMA SEÇÃO DE PASTA DE CIMENTO ENDURECIDA E SATURADA: a) SEM DISTÚRBBIO; b) SOB AÇÃO DE UM CAMPO ELÉTRICO



FONTE: Adaptado de Brameshuber e Raupach (2003) e Zhang *et al.* (2014).

Podem ser vistos na Figura 2: o gel do cimento, representado pelas cores escuras, os poros contínuos, descontínuos ou fechados, contendo partículas eletricamente carregadas. Representam-se na condição da Figura 2(a), sem qualquer perturbação elétrica, as partículas de carga positiva e negativa distribuídas aleatoriamente pela solução aquosa presente nos poros. Todavia, sob ação de um campo elétrico, como representado na Figura 2(b), os ânions tendem a se movimentar e se concentrar, o mais próximo possível, do ânodo e, por sua vez, os cátions se movimentam na direção do cátodo. Assim, os poros contínuos permitem o fluxo de

carga elétrica, enquanto os poros descontínuos e fechados, bloqueiam (BRAMESHUBER; RAUPACH, 2003).

De acordo com diversos autores, a resistividade elétrica do concreto pode ser obtida de maneira fácil, rápida e de baixo custo por ensaio não destrutivo. Dentre os métodos de medição, o mais popular e mais ágil é o método de Wenner, ou dos quatro pontos, que pode ser usado em campo ou em laboratório (POLDER, 2000, 2001; ANDRADE; D'ANDREA, 2011; MEDEIROS-JUNIOR, 2016; BALESTRA, 2019). Por outro lado, o método direto é restrito a laboratório, com amostras saturadas (POLDER, 2000, 2001; ASTM C1876-19).

A medida da resistividade é obtida pela aplicação da lei de Ohm, seguida da aplicação de uma constante da célula. Essa operação é válida apenas para sólidos homogêneos. Como o concreto não é um material homogêneo, as leituras de resistividade obtidas são medidas aparentes. Dentre os métodos de medição, o de Wenner é o que melhor minimiza o impacto da falta de homogeneidade. (ANDRADE, 1993; MORRIS; MORENO; SAGÜÉS, 1996; POLDER, 2000, 2001).

O procedimento de medição de resistividade consiste na aplicação de uma tensão conhecida entre dois pontos uma célula, de geometria e material particular – a corrente passante será medida. Analogamente, a segunda opção consiste em aplicar uma corrente elétrica conhecida e, a diferença de potencial será medida (POLDER, 2000, 2001).

Pela lei de Ohm, o quociente entre a tensão e a corrente elétrica descreve a resistência elétrica aparente, como se apresenta na equação (1).

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

onde:

R: resistência elétrica aparente;

V: diferença de potencial;

I: corrente elétrica.

A equação (2) calcula a resistividade elétrica pelo produto da resistência elétrica e da constante da célula, que depende do formato do elemento em teste.

$$\rho = k \cdot R \quad (2)$$

onde:

ρ : resistividade elétrica;

R: resistência elétrica aparente;

k: constante da célula (LAYSSI, 2015).

A constante da célula, ou fator geométrico depende do tamanho, da forma da amostra e da distância percorrida pela corrente elétrica; é medida em unidade de comprimento (AENOR UNE 83988-2:2014), de acordo com Polder (*et al.* 2000, 2001), pode ser obtida teoricamente, ou por calibração através de moldes padronizados de concreto, ou eletrólitos de resistividade conhecida. No método direto, para determinação da REV, k é calculada pela equação (3).

$$k = \frac{A}{L} \quad (3)$$

onde:

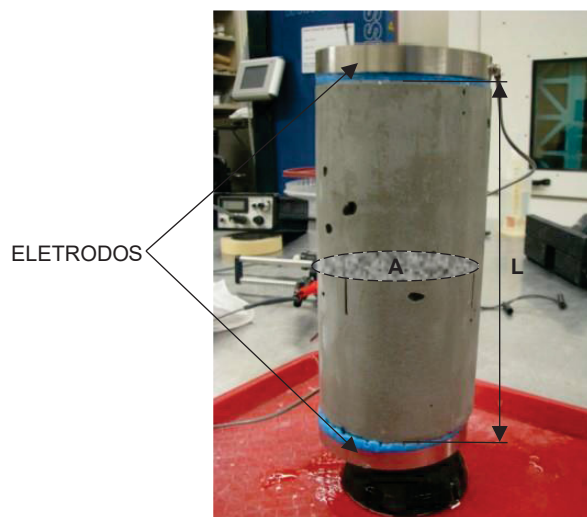
k: constante da célula;

A: seção transversal, perpendicular ao sentido da corrente elétrica que percorre do corpo de prova;

L: distância entre os eletrodos (LAYSSI, 2015; POLDER, 2000, 2001; SPRAGG, 2011).

A Figura 3 apresenta um corpo de prova durante uma tomada de medição de resistividade elétrica no concreto, pelo método direto.

FIGURA 3 – MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA PELO MÉTODO DIRETO



FONTE: Spragg (2011).

É possível observar na Figura 3, os eletrodos metálicos distanciados pelo comprimento do corpo de prova, L e o corpo de prova, com seção transversal, A, perpendicular ao sentido da corrente elétrica.

No método de Wenner, de acordo com Millard *et al.* (1990a), bem como, Polder (*et al.* 2000, 2001), a constante da célula é dada pela equação (4), quando as leituras são tomadas na superfície plana de um sólido de geometria semi-infinita.

$$k = 2\pi a \quad (4)$$

Onde:

k: constante da célula;

a: distanciamento entre eletrodos;

Minagawa *et al.* (2023), através de simulações por método de elementos finitos (MEF), comparadas a resultados experimentais, propuseram equações da constante da célula em função do distanciamento entre eletrodos, das dimensões e da geometria dos corpos de prova.

Em outras palavras, dado um corpo de concreto de forma geométrica genérica, submetido a um campo elétrico – a sua resistividade elétrica é dada pelo produto de sua resistência elétrica, pelo quociente da seção transversal pela distância percorrida pela corrente elétrica. Outrossim, a resistividade é definida pela resistência elétrica de um cubo unitário (NGUYEN, 2017).

A unidade dimensional usual da resistividade é denotada pelo produto de uma unidade de resistência elétrica por uma unidade de comprimento, por exemplo: ohm metro (Ωm).

2.1.1 Fatores influenciadores da resistividade elétrica do concreto

São fatores que influenciam na resistividade: a composição química da solução aquosa presente nos poros; a quantidade, o tamanho, a distribuição e a interconectividade dos poros; o grau de hidratação; o tipo de cimento; a presença de adições; o tamanho dos agregados; a armadura e a temperatura do concreto (ACI 201, 2016; POLDER, 2000, 2001; SPRAGG, 2011, 2013). A carbonatação aumenta a resistividade pela redução da disponibilidade de íons para o transporte de corrente e, também pela eventual densificação da camada de concreto carbonatado (POLDER, 2000, 2001).

Os fatores relativos à metodologia de teste, que mais têm impacto sobre a resistência elétrica, de acordo com Millard *et al.* (1990), são: tensão e frequência, tamanho e geometria da amostra, tipo de eletrodo e, tipo de contato elétrico. Paralelamente, para Spragg *et al.* (2011), os mais importantes fatores a serem

considerados em um teste de resistividade são: a geometria, a temperatura e a umidade da amostra. Gowers e Millard (1999) relatam as interferências de medição observadas em seus experimentos com o método de Wenner. Medeiros (2001) divulga recomendações para tomada de medição e interpretação de resultados obtidos pelo método de Wenner.

Araújo, Macioski e Medeiros (2022) avaliaram experimentalmente, os efeitos da dimensão e geometria do corpo de prova no método de Wenner. Em seu trabalho, leituras de RES em corpos de prova cilíndricos de diferentes (100 mm x 200 mm e 150 mm x 300mm; diâmetro x comprimento) foram comparadas a leituras tomadas em corpos de prova de referência – cubos de aresta igual a 250 mm, que de acordo com os autores, são suficientemente grandes ao ponto de simular um sólido ideal para medição de RES pelo método de Wenner. Assim, novos valores das constantes de correção de célula, ou fator de forma (AENOR UNE 83988-2:2014), diferentes dos propostos na norma em referência foram propostos. A Tabela 1 apresenta os novos valores propostos pelos autores, diante da prescrição normativa.

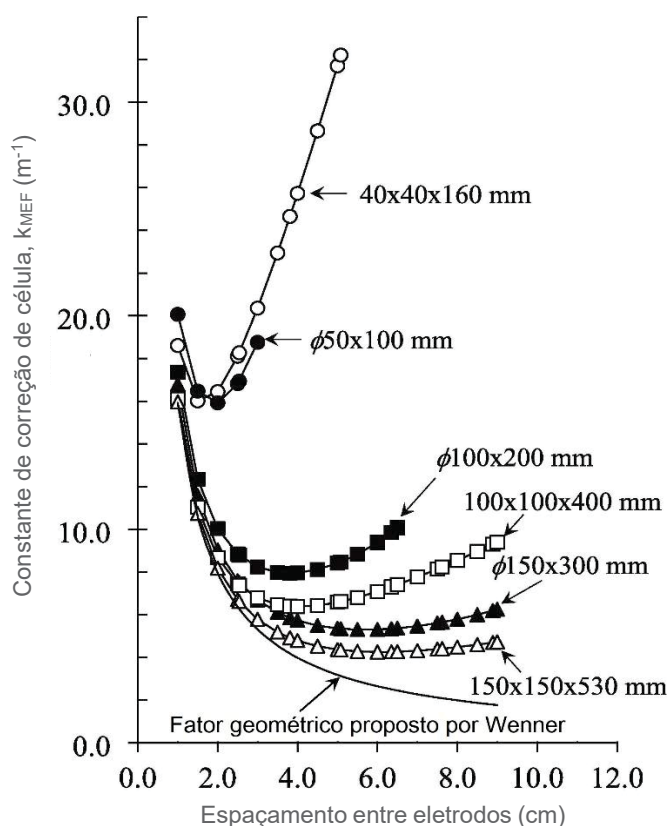
TABELA 1 – CONSTANTES DE CORREÇÃO DE CÉLULA, COM $a = 50$ mm, PROPOSTOS POR ARAÚJO, MACIOSKI E MEDEIROS (2022)

Corpo de prova cilíndrico	AENOR UNE 83988-2:2014	Araújo, Macioski e Medeiros (2022)
Diâmetro 150 mm x comprimento 300 mm	0,606	0,802
Diâmetro 100 mm x comprimento 200 mm	0,377	0,547

FONTE: Araújo, Macioski e Medeiros (2022)

Minagawa *et al.* (2023), através de simulações por MEF do método de Wenner, comparadas a resultados experimentais, propuseram equações da constante da célula, ou fator geométrico, em função da geometria e dimensões do corpo de prova e do distanciamento entre eletrodos. Os autores observam que um maior distanciamento entre eletrodos incrementa a constante da célula em relação aos valores propostos por Wenner. A Figura 4 ilustra os resultados obtidos pelos autores em relação aos propostos por Wenner.

FIGURA 4 – CONSTANTE DA CÉLULA EM FUNÇÃO DAS DIMENSÕES DO CORPO DE FORMA E DISTANCIAMENTO ENTRE ELETRODOS



FONTE: Minagawa *et al.* (2023).

Na Figura 4, identifica-se a tendência de que os pontos de inflexão se aproximem do eixo vertical, ao mesmo tempo em que se afastam do eixo horizontal, em função da redução da dimensão dos corpos de prova. Entretanto, menores espaçamentos entre eletrodos resultaram em valores mais próximos aos valores propostos por Wenner. Sendo assim, de acordo com Minagawa *et al.* (2023), como observado na Figura 4, o impacto do afastamento entre eletrodos foi aumentar a divergência entre os valores propostos por Wenner e os resultados por eles encontrados. Concluíram os autores, que um fator geométrico apropriado deve ser escolhido em função da geometria e dimensões do corpo de prova, considerando o afastamento entre eletrodos.

A respeito do impacto da temperatura sobre a resistividade elétrica, a variação de temperatura entre os limites de 0 e 40°C reduz a resistividade em 50% ao incremento de 20°C, o que corresponde a uma variação de resistividade elétrica de três a cinco por cento a cada grau Celsius (POLDER 2000, 2001). Torres-Acosta *et al.* (2018 *apud* TORRES-ACOSTA; PRESUEL-MORENO; ANDRADE, 2019) observaram um acréscimo de 30% na resistividade medida em temperatura ambiente

de 15°C em relação à medida a 22±2°C. Para concretos com tempo de hidratação do cimento menor de 28 dias, Tomlinson *et al.* (2017) identificaram que acima de 0°C, as mudanças de resistividade seguem curvas exponenciais de Arrhenius.

Gowers e Millard (1999) recomendam não usar corrente contínua nos testes de resistividade, pois segundo os autores, isso acarretaria em problemas de polarização na superfície de contato entre os eletrodos e o concreto. Recomendações da frequência da corrente elétrica para serem utilizadas em métodos de medição de resistividade elétrica são apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2 – FREQUÊNCIA DE CORRENTE ELÉTRICA PARA MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO CONCRETO, SEGUNDO ALGUNS AUTORES

Referência	Método de medição	Frequência	Formato de onda
ASTM C1876-19	Direto	100 Hz a 1.000 Hz	Ondas senoidais
Gowers e Millard (1999)	Wenner	< 30 Hz	Ondas quadradas
Gowers e Millard (1999)	Wenner	< 1 Hz	Ondas senoidais
Layssi <i>et al.</i> (2015)	Direto	500 Hz a 10.000 Hz	-
Layssi <i>et al.</i> (2015)	Wenner	10 Hz a 10.000 Hz	-
Newlands <i>et al.</i> (2008)	Direto	128 Hz	-
Spragg (2013)	Direto	794 Hz*	-

NOTA – * frequência na qual o menor ângulo de fase, mais próximo de zero, foi encontrado.

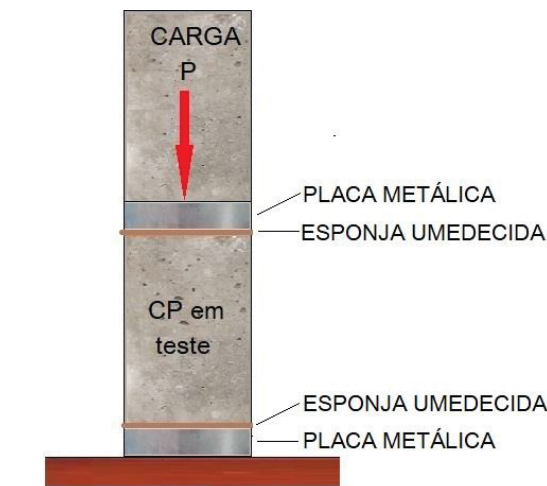
FONTE: O autor (2023).

Spragg *et al.* (2013) e Layssi *et al.* (2015) explicam que em materiais cimentícios saturados a variação da frequência elétrica acarreta em diferentes medidas de impedância elétrica. A impedância elétrica possui duas componentes, uma real e outra imaginária. No circuito do método direto, a componente uniaxial, sob o ângulo de fase de zero, é a que mais se aproxima da resistência elétrica, se essa fosse medida em um circuito de corrente contínua. Segundo os autores a frequência dá respostas diferentes em função da idade, da condição de saturação e do tipo da solução aquosa presente nos poros dos corpos de prova.

Há recomendações de pressão de contato entre os eletrodos e o corpo de prova e tipo de solução condutiva para umedecimento das esponjas. Segundo Newlands *et al.* (2008), essa pressão é de seis kPa e a solução aquosa de umedecimento recomendada é de cloreto de sódio. Paralelamente, segundo a norma ASTM C1876-19, a pressão é a equivalente a uma carga de no mínimo 3 kg sobre a célula e o umedecimento das esponjas pode ser feito com a própria solução de cura submersa ou com algum tipo de gel condutivo. A Figura 5 ilustra uma das possíveis

configurações de montagem arranjo experimental conforme as recomendações da norma ASTM C1876-19.

FIGURA 5 – PRESSÃO SOBRE OS ELETRODOS DE ACORDO COM ASTM C 1876-19



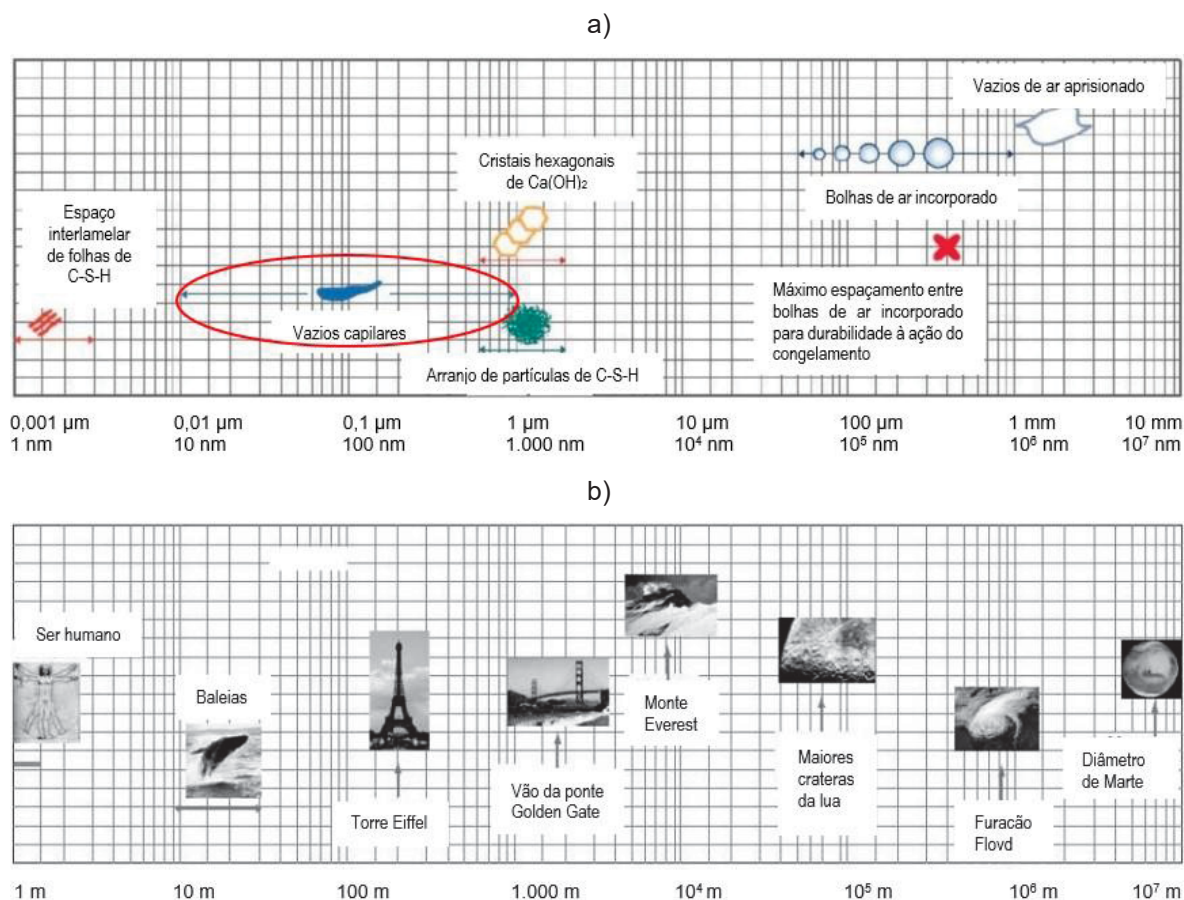
FONTE: O autor (2023).

2.1.2 Correlações entre a resistividade elétrica do concreto e a durabilidade

A resistividade elétrica se relaciona à permeabilidade de fluidos e difusividade iônica no concreto (ANDRADE, 2011; HOPPE FILHO, 2013; MEDEIROS-JUNIOR; GANS, 2017; MEDEIROS-JUNIOR; MUNHOZ; MEDEIROS, 2019). O meio poroso da matriz cimentícia funciona como uma rede de canais de transporte de substâncias gasosas, líquidas e iônicas, de origem interna ou externa ao concreto. De acordo com a publicação do ACI (*American Concrete Institute*), 201.2R16 (2016), as interações entre as diferentes substâncias presentes no concreto, têm suas particularidades, impactando ou não, sobre a durabilidade. Portanto o mecanismo de transporte tem que ser vinculado à substância em questão. Sendo assim, segundo a publicação, os concretos mais duráveis são os menos permeáveis aos agentes agressivos presentes no meio ambiente.

Para melhor compreensão dos processos de transporte através da microestrutura porosa do concreto, a Figura 6 apresenta diversos intervalos dimensionais das fases sólidas e dos vazios da microestrutura da pasta no concreto.

FIGURA 6 – DIAGRAMA DO INTERVALO DIMENSIONAL DE SÓLIDOS E POROS EM UMA PASTA ENDURECIDA: a) ELEMENTOS PRESENTES NA PASTA; b) ESCALA COMPARATIVA



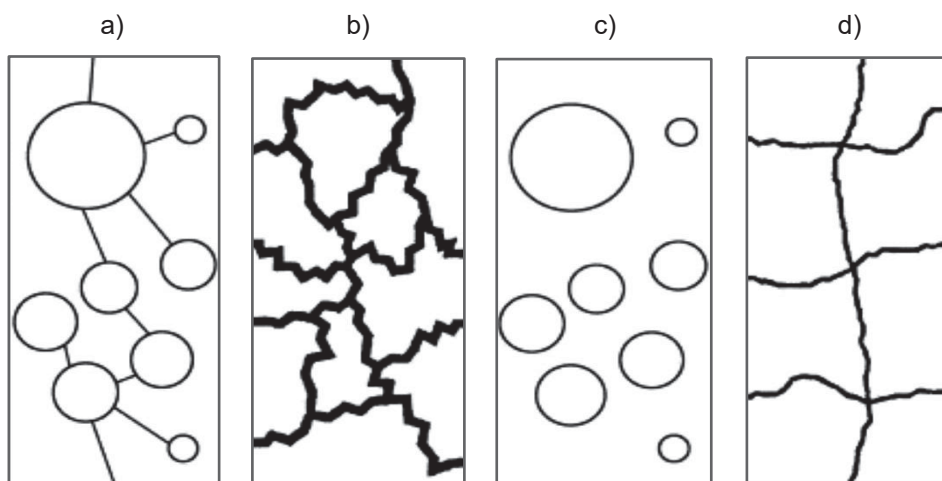
FONTE: Mehta e Monteiro (2013).

Na Figura 6, a escala dimensional dos elementos presentes em uma pasta de cimento endurecida, observada na Figura 6(a), pode ser comparada ao intervalo compreendido entre a altura de um ser humano ao diâmetro do planeta Marte, na Figura 6(b) (MEHTA; MONTEIRO, 2013). Destaca-se na Figura 6(a), o intervalo dimensional dos vazios capilares, da ordem de dezenas de nanômetros a unidades de micrômetros. Observa-se que dentre os elementos destacados, os vazios capilares são apenas maiores que o espaçamento interlamelar entre partículas de C-S-H. Entretanto são os vazios capilares responsáveis pela maior parte da condução de massa através dos poros do concreto (ACI 201.2R16, 2016).

De acordo com o guia do Instituto Americano do Concreto ACI 201.2R16 (2016), as propriedades de transporte em um meio poroso são mais influenciadas pela interconectividade dos poros, do que pela porosidade ou dimensão dos poros. A Figura 7 mostra, de maneira esquemática, a diferença entre porosidade e

permeabilidade através de uma comparação entre materiais de porosidade aparentemente semelhante.

FIGURA 7 – PERMEABILIDADE DE MEIOS POROSOS: a) ALTA POROSIDADE E BAIXA PERMEABILIDADE; b) POROSO E ALTA PERMEABILIDADE; c) POROSO E IMPERMEÁVEL; d) BAIXA POROSIDADE E ALTA PERMEABILIDADE



FONTE: Eurolightcon (1998, *apud* CHIA; ZHANG, 2002).

A Figura 7(a) mostra que um material bastante poroso pode ser pouco permeável, pois seus grandes poros são conectados por estreitos canais. Outro material, de mesma porosidade, Figura 7(c), é impermeável porque não há conexão entre os poros. O material retratado na Figura 7(b) possui canais, que apesar de tortuosos, são muitos e são largos, o que lhe confere alguma porosidade e alta permeabilidade. Na Figura 7(d), se observa um material cuja rede de poros possui poucos canais estreitos, mas pouco tortuosos, o que torna o material pouco poroso, mas muito permeável (CHIA; ZHANG, 2002; ACI 201.2R16, 2016).

O Instituto Americano do Concreto relata sua definição de durabilidade¹ ao mesmo tempo que aponta para sua estreita relação com processos de transporte, que atuam em conjunto, em meios porosos não reativos. Por sua vez, de acordo com diversos autores, esses processos de transporte são relacionados à resistividade elétrica do concreto (ANDRADE, 1993; ANDRADE; D'ANDREA, 2010, 2011; CHRISTENSEN; COVERDALE; OLSON, 1994; MEDEIROS-JUNIOR, 2019; NEITHALATH, 2006; POLDER, 2000, 2001).

¹ “O projeto, detalhamento e execução do concreto, feito para resistir ação de agentes atmosféricos, ataque químico, abrasão e outros processos de deterioração ao longo da vida útil projetada, irá determinar sua durabilidade” (ACI 201.2R16, 2016).

Ratificando as observações encontradas em ACI 201.2R16 (2016), Christensen, Coverdale e Olson (1994) relacionam a condutividade a: (1) uma parcela da porosidade; (2) condutividade da solução presente nos poros; e (3) interconectividade dos poros. Para os autores, a condutividade permite prever a difusividade iônica e a permeabilidade à água. Paralelamente, Neithalath (2006) correlacionaram características da estrutura de poros e a permeabilidade a propriedades elétricas do concreto.

2.1.3 Medidores de resistividade disponíveis no mercado

Em função das vantagens e baixo custo da técnica de medição da resistividade elétrica em relação a outras técnicas de ensaios não destrutivos, alguns aparatos de medição de resistividade elétrica são produzidos em série e estão disponíveis no mercado internacional. A Tabela 3 lista alguns modelos suas características.

TABELA 3 - DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO, DISPONÍVEIS NO MERCADO INTERNACIONAL

Modelo	Marca	Princípio de funcionamento*	Normatização*
Resipod	Proceq	Wenner	AASHTO T358
Surf	Giatec	Wenner	AASHTO T358
Rcon	Giatec	Método direto	ASTM C1876
SmartBox™	Giatec	-	AASHTO TP95
Merlin	Germann Instruments	-	ASTM C1760

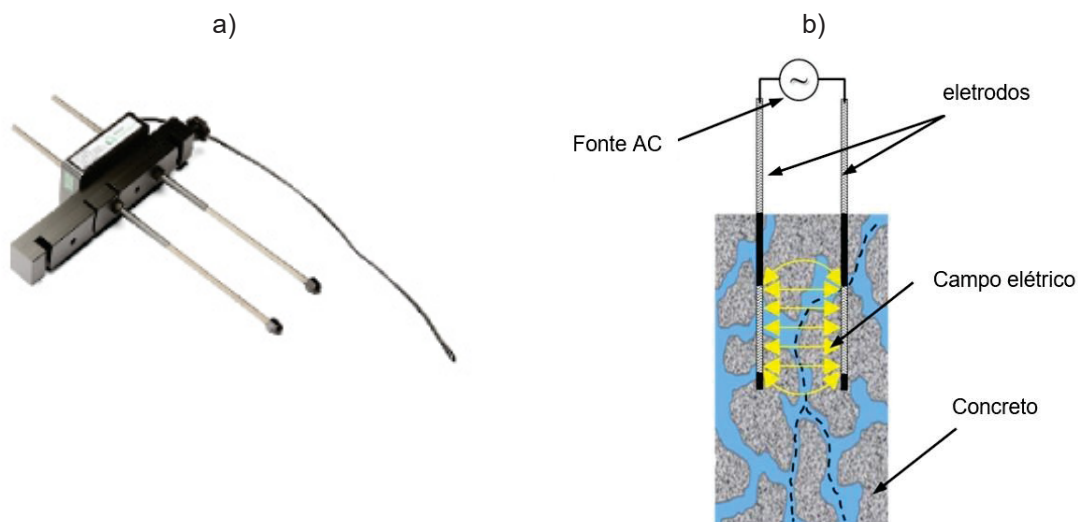
NOTA - * informação do fabricante.

FONTE: O autor (2023).

Na Tabela 3 observam-se os padrões normativos e o princípio de funcionamento, de acordo como declarado pelos respectivos fabricantes. O padrão AASHTO TP95 é o antecessor ao atual AASHTO T358-19. As patentes de Hasegawa (2013), Kim, Lee e Moon (2017) e Alizadeth (2020), de medidores de resistividade elétrica do concreto, têm seus registros na Ásia e na América do Norte.

A Figura 8 ilustra o dispositivo e o respectivo esquema conceitual de funcionamento do dispositivo *SmartBox™*.

FIGURA 8 – MEDIDOR DE REV: a) DISPOSITIVO *SMARTBOX™*, DE LEITURA DE RESISTIVIDADE; b) ESQUEMA CONCEITUAL DE FUNCIONAMENTO

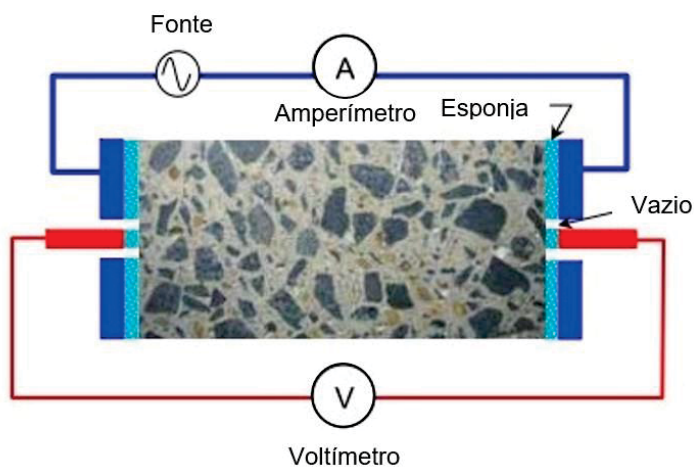


FONTE: Giatec (2021).

A Figura 8 mostra o dispositivo *SmartBox™* cujos eletrodos em forma de haste são inseridos no concreto fresco durante a moldagem, momento no qual podem ser iniciadas as medições.

A Figura 9 apresenta o esquema conceitual do dispositivo *Merlin*, da Germann, de leitura de REV. Nesse modelo, são empregados quatro eletrodos. Dois eletrodos de para aplicação de corrente elétrica tem formato de anel, no diâmetro do corpo de prova são posicionados nas extremidades do corpo de prova. Os eletrodos de leitura de tensão, posicionados no centro dos anéis de aplicação de corrente, fazem contato pontual com a superfície do corpo de prova, ao mesmo tempo que, não tocam os eletrodos de aplicação de corrente.

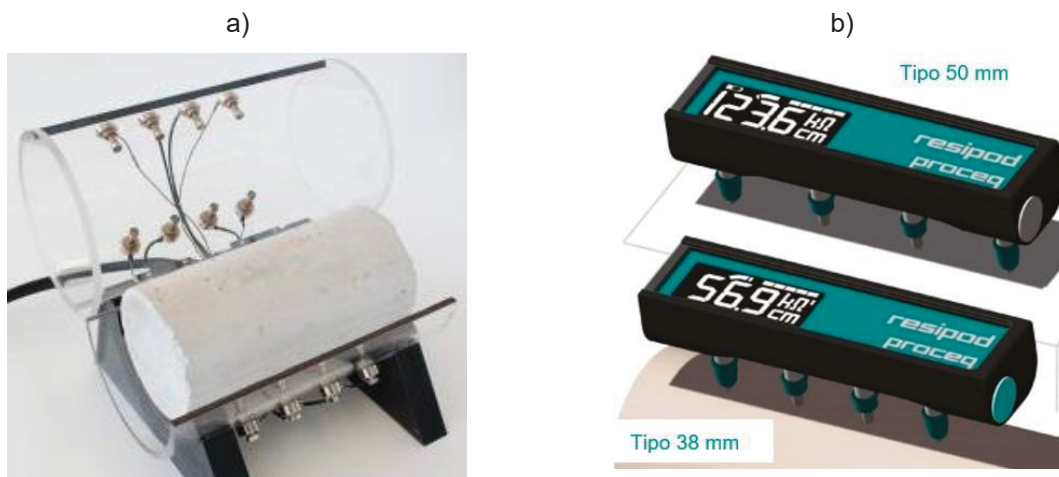
FIGURA 9 – ESQUEMA CONCEITUAL DE DISPOSITIVO DE LEITURA DE RESISTIVIDADE



FONTE: Germann (2014).

A Figura 10 apresenta o dispositivo *SurfTM*, da Giatec e, o *Resipod*, da Proceq, de leitura de RES pelo método de Wenner.

FIGURA 10 – DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO DE RES: a) FABRICANTE GIATEC; b) FABRICANTE PROCEQ



FONTE: a) Giatec (2021); b) Proceq (2017).

A Figura 10(a) ilustra o dispositivo *SurfTM*, da Giatec, cuja vantagem é possuir quatro canais de leitura simultânea. O dispositivo Resipod, da Proceq, visto na Figura 10(b), indica a leitura de RES no visor de embutido, é comercializado em duas versões com espaçamento entre eletrodos diferente, de 50 mm e de 38 mm. O Resipod pode ser usado em campo, como também em laboratório.

2.2 RISCO DE CORROSÃO DE ARMADURAS

A corrosão de armaduras é um processo eletroquímico e a resistividade elétrica do concreto reflete a intensidade do fluxo iônico no concreto. A relação entre a taxa de corrosão e a resistividade elétrica é inversamente proporcional. Portanto, um baixo valor de resistividade indica uma alta taxa de corrosão e vice-versa. Entretanto, tais conclusões têm caráter meramente qualitativo (ANDRADE; ALONSO, 2001; BALESTRA, 2019; BROOMFIELD; MILLARD, 2002; POLDER, 2000, 2001).

Conhecendo-se apenas a resistividade elétrica, não é possível saber se a armadura está ou não em processo de corrosão, mas caso a corrosão esteja ocorrendo, é possível encontrar, na estrutura, onde a corrosão é mais intensa (BALESTRA, 2019; MEDEIROS, 2001; POLDER, 2000, 2001). Segundo Polder (et al. 2000, 2001), é possível avaliar as áreas de maior susceptibilidade a penetração de cloretos e da mesma forma, áreas mais ou menos saturadas. Nas áreas de mais baixa

resistividade, a penetração de cloretos pode ocorrer com mais velocidade. Caso a armadura já esteja despassivada, a taxa de corrosão deve ser mais alta quanto menor seja a resistividade elétrica.

Conclusões quantitativas pautadas em resistividade elétrica, podem ser tomadas quando aliadas a outros parâmetros. Por exemplo, a taxa de corrosão pode ser estimada em função da resistividade elétrica, juntamente com a resistência à polarização linear. Feliu *et al.* (1996) afirmam que o desenvolvimento do equipamento denominado GECOR-6 foi um marco inicial para mensurar a taxa, ou velocidade, de corrosão de armaduras, em campo. Seu funcionamento é fundamentado nas técnicas de resistividade elétrica, potencial de corrosão de circuito aberto e resistência à polarização linear (FELIU, 1990; LIU; WEYERS, 1998). Logo, os cientistas tiveram acesso a uma quantidade significativa de dados de taxa de corrosão, o que tornou possível correlacioná-los a dados de resistividade elétrica. Segundo os autores, até então, uma correlações confiáveis, entre resistividade e nível de risco de corrosão, não poderia ser estabelecida.

Polder *et al.* (2000, 2001), afirmam que apesar da correlação entre resistividade elétrica e a taxa de corrosão de armaduras estar sujeita a revisão, ainda é possível tomarem-se conclusões. Hornbostel, Larsen e Geiker (2013) afirmam que há desvios significativos entre diferentes estudos que propõem essas correlações. A Tabela 4 apresenta algumas dessas correlações segundo diferentes autores.

TABELA 4 – FAIXAS DE RISCO DE CORROSÃO DE ARMADURAS EM FUNÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA, SEGUNDO DIFERENTES AUTORES

(Continua)

Referência	Restrições	Resistividade (Ω m)	Risco de corrosão
Manual de instruções GECOR 06 (<i>apud</i> FELIU, 1996)	Não disponível	< 100	A resistividade não é o parâmetro que controla a taxa de corrosão
		100 a 1000	Baixa a alta taxa de corrosão
		> 1000 a 2000	A taxa de corrosão será muito baixa mesmo que o concreto esteja carbonatado ou contaminado por cloretos
Publicação RILEM TC 154-EMC (<i>apud</i> POLDER, 2000, 2001)	Concretos de cimento portland comum, a temperatura de 20°C	< 100	Alto
		100 a 500	Moderado
		500 a 1000	Baixo
		> 1000	Negligenciável

TABELA 4 – FAIXAS DE RISCO DE CORROSÃO DE ARMADURAS EM FUNÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA, SEGUNDO DIFERENTES AUTORES

(Conclusão)

Referência	Restrições	Resistividade (Ω m)	Risco de corrosão
Andrade e Alonso (2001)	Concretos de cimento portland comum ou composto	< 100	A resistividade não é o parâmetro que controla a taxa de corrosão
		100 a 500	Taxa de corrosão moderada a alta, quando a armadura está despassivada
		500 a 1000	Baixa taxa de corrosão
		> 1000 a 2000	Corrosão negligenciável, concreto muito seco
Publicação CEB 192 (1989, <i>apud</i> MEDEIROS, 2001)	Concretos saturados em ambiente de laboratório	< 50	Muito alto
		50 a 100	Alto
		100 a 200	Baixo
		> 200	Desprezível
Broomfield e Millard (2002, <i>apud</i> BALESTRA, 2019)	Não disponível	< 50	Alto
		50 a 200	Moderado
		> 200	Baixo
Balestra <i>et al.</i> (2019)	Estruturas com mais de 40 anos, em ambiente marinho	< 150	Muito alto
		150 a 200	Alto
		200 a 550	Moderado
		550 a 800	Baixo
		> 800	Negligenciável

FONTE: O autor (2023).

Na Tabela 4, observa-se que diversos autores e entidades de pesquisa, como o Comitê Euro-Internacional do Concreto (CEB) e os comitês científicos RILEM publicaram correlações entre a resistividade elétrica e o risco de corrosão de armaduras (CEB 192, 1989 *apud* MEDEIROS, 2001; POLDER, 2000, 2001; ANDRADE; ALONSO, 2001; BROOMFIELD, 2002 *apud* BALESTRA, 2019; BALESTRA, 2019). Acima de tudo, observa-se que há concordância quanto a proporcionalidade inversa entre a resistividade e o risco de corrosão. Segundo Medeiros (2001), a correlação sugerida pelo CEB 192 (1989) tem grande aceitação no meio técnico-científico.

2.3 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

A resistência à penetração de cloretos pode ser determinada pelo RCPT. Essa é a sigla em inglês para “*rapid chloride permeability test*”, que significa teste rápido de permeabilidade de cloretos. Proposto por Whiting (ANDRADE, 1993, p. 726), normatizado pela ASTM C1202-19, o RCPT é um dos mais populares testes baseados em conceitos elétricos, de acordo com Spragg (2011, p. 1). Esse teste é amplamente aceito para avaliação de durabilidade do concreto, apesar de muito criticado (ANDRADE, 1993; FHWA, 2017; LAYSSI, 2015).

Levando em conta o longo tempo de execução dos ensaios de difusão, que podem demorar até um ano, pesquisadores optaram por acelerar a penetração de cloretos através da aplicação de um potencial elétrico (ANDRADE, 1993; WHITING, 1981). No caso do RCPT, uma tensão de 60 VDC é aplicada na célula entre os extremos do corpo de prova durante seis horas². Mede-se a corrente elétrica passante a cada 30 minutos. No final do ensaio, a carga elétrica passante acumulada é calculada pela integração da curva das leituras da corrente elétrica observadas. Essa quantidade de carga, em Coulombs é tomada como parâmetro de avaliação da movimentação iônica através da microestrutura porosa do concreto.

A Tabela 5 apresenta a correlação entre o resultado do RCPT e a penetrabilidade de íons cloreto, de acordo com Whiting (1981) e ASTM C1202-19. Observa-se que, quanto maior a carga passante, maior é a penetrabilidade de íons cloreto.

TABELA 5 – PENETRABILIDADE DE CLORETOS EM FUNÇÃO DA CARGA ACUMULADA NO RCPT (ASTM C1202-19)

Carga passante acumulada (Coulombs)	Penetrabilidade de íons cloreto
> 4.000	Alta
2.000 a 4.000	Moderada
1.000 a 2.000	Baixa
100 a 1.000	Muito baixa
< 100	Negligenciável

FONTE: ASTM C1202-19.

² Whiting (1981) testou tensões de 10 V a 120 V, durante tempos de aplicação diferentes, comparando os resultados a testes então convencionais de permeabilidade a cloretos. Segundo o autor, menores tensões aplicadas durante tempos menores são razoáveis para concretos mais permeáveis. A escolha da duração do ensaio priorizou a que coubesse no horário de expediente, sem horas extra.

Como demonstrado em diversos trabalhos, a resistividade elétrica se correlaciona com o ensaio RCPT (ANDRADE, 1993; ANDRADE; WHITING, 1996; HOPPE FILHO, 2013; KONEČNÝ, 2017; RAMEZANIANPOUR, 2011; RUPNOW; ICENOGLE, 2012; TORRES-ACOSTA; PRESUEL-MORENO; ANDRADE, 2019; WOSNIACK, 2021). Isso se deve à semelhança do arranjo experimental (ANDRADE, 1993; HOPPE FILHO, 2013).

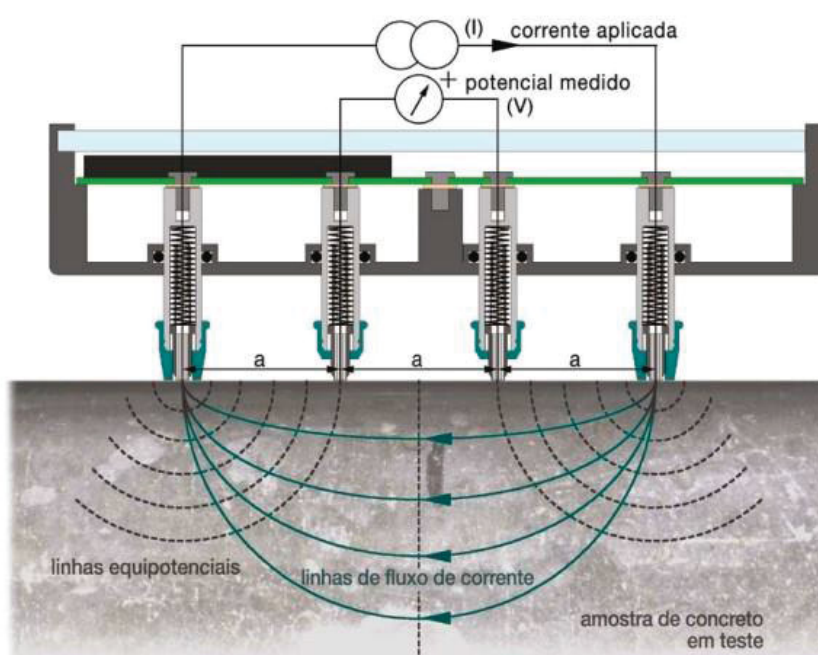
2.4 MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO CONCRETO

Os métodos abordados neste trabalho são: o de Wenner, o direto e o da resistividade elétrica extraída do RCPT. Este último ensaio não foi concebido para se determinar a resistividade elétrica do concreto, mas dele é possível extraí-la (ANDRADE; WHITING, 1996; HOPPE FILHO, 2013; KONEČNÝ, 2017; WOSNIACK, 2021).

2.4.1 Método de Wenner

O método de Wenner, também conhecido como método dos quatro pontos, serve para determinar a RES. A Figura 11 demonstra o esquema de funcionamento de um aparato de medição de Wenner.

FIGURA 11 – ESQUEMA DO DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO E DO FUNCIONAMENTO DO TESTE DE RES PELO MÉTODO DE WENNER



FONTE: Proceq (2017).

Observam-se na Figura 11, os quatro eletrodos alinhados e equidistantes, separados por uma distância a , em contato com uma superfície de concreto. Uma pequena corrente alternada I , é aplicada entre os eletrodos externos. A corrente elétrica se distribui pelo corpo de prova, descrevendo linhas de fluxo de corrente no sentido longitudinal ao alinhamento dos eletrodos. Os eletrodos internos medem a diferença de potencial V .

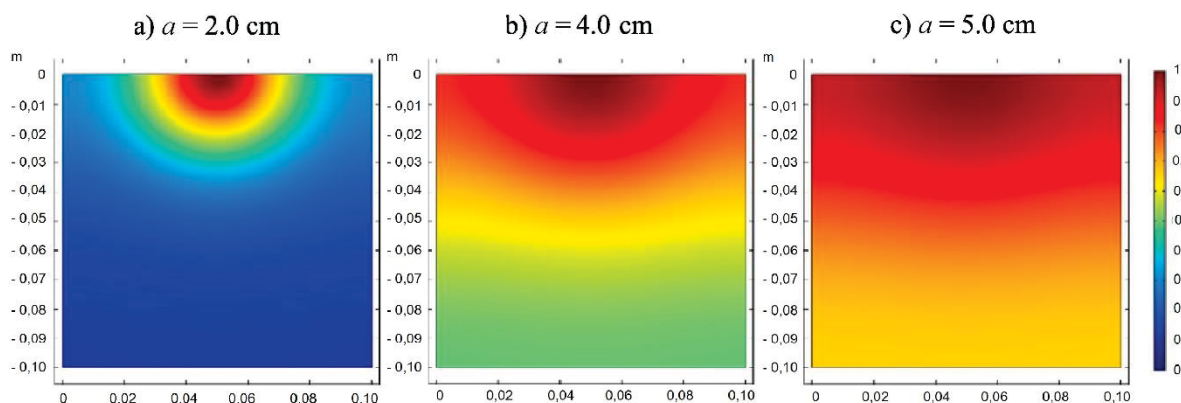
De acordo com Millard, Davies e Bungey (1990), bem como, Polder *et al.* (2000, 2001), o método serve para um sólido homogêneo, de superfície plana e infinita, e espessura infinita – que seria o meio ideal para aplicação do método de Wenner. Na prática, essa condição geométrica semi-infinita retrata um sólido de área e espessura suficientemente grandes, de forma que as linhas de corrente não sofram interferência da limitação dimensional do corpo de prova.

A leitura de resistividade é a RES aparente devido a natureza não ideal do meio, portanto, ela precisa ser corrigida. Essa correção se dá em função da geometria e dimensões do corpo de prova e, do espaçamento a , entre eletrodos. Propostas de correção de forma são sugerida por Morris, Moreno e Sagüés (1996), AENOR UNE EN 83988-2:2014 e Araújo, Macioski e Medeiros (2022). Esses autores propõem uma constante de correção de célula, também conhecida por fator de forma.

A distância entre eletrodos a , pode ser ajustada (POLDER, 2000, 2001), conforme a necessidade do operador. Esse ajuste determina a espessura da camada de material na qual a RES é medida (HERMAN, 2001; MINAGAWA, 2023; MORRIS; MORENO; SAGÜÉS, 1996; MINAGAWA, 2023). Essa é uma característica do método, que permite minimizar influências tais como: variações de exposição ao meio ambiente e consequente variações do grau de saturação e de temperatura; presença de partícula de agregado; carbonatação e outras – limitando-se à presença de armaduras (POLDER, 2000, 2001).

A Figura 12 apresenta uma simulação por MEF, do efeito do distanciamento “ a ”, entre eletrodos sobre a distribuição da densidade de corrente elétrica em uma seção de um corpo de prova prismático de dimensões 100 mm x 100 mm x 400 mm. Fica evidenciado que, de acordo com a simulação pelo método dos elementos finitos, a distribuição da densidade de corrente elétrica é influenciada pela variação do distanciamento “ a ”, entre eletrodos.

FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA DO MÉTODO DE WENNER NA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA: a) $a = 2$ cm; b) $a = 4$ cm; c) $a = 5$ cm



FONTE: Adaptado de Minagawa *et al.* (2023).

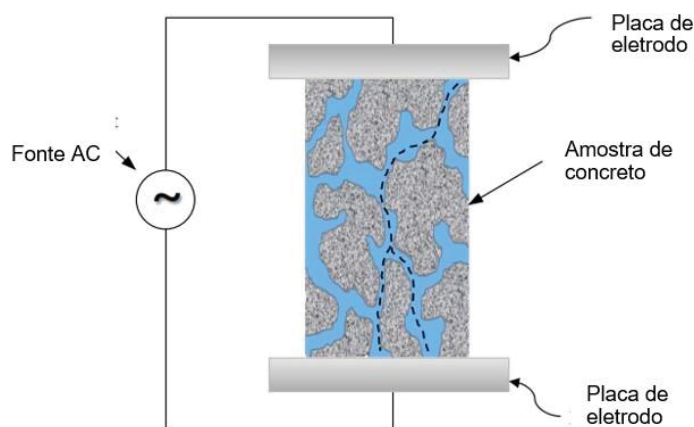
Observa-se, na Figura 12(a), em cujo distanciamento entre eletrodos é igual a 2 cm, que a uma profundidade de 0,02 m, a densidade de corrente está próxima de 0,6. Na Figura 12 (c), com distanciamento entre eletrodos igual a 5 cm, a profundidades entre 0,04 m e 0,05 m, a densidade de corrente é de aproximadamente 0,8. Isso significa que a corrente elétrica percorre camadas mais profundas do corpo de prova, em relação aos pontos de contato dos eletrodos, quanto maior seja o distanciamento entre eles. Minagawa *et al.* (2023) concluem que “a” menor, tende a mostrar resultados influenciados pelas condições superficiais do concreto.

2.4.2 Método direto

De acordo com Polder *et al.* (2000, 2001), o método direto, ou uniaxial, é mais preciso, mas sua aplicação é mais difícil do que o método de Wenner. Referenciado como método de referência, foi concebido para ser aplicada em amostras preparadas em laboratório. Amostras de campo, extraídas de estruturas, podem ser testadas, desde que sejam observadas a condição de saturação e geometria do corpo de prova. O material deve estar saturado, sua geometria deve possuir seção transversal constante, as faces de conexão dos eletrodos devem ser planas e paralelas (AENOR UNE 83988-1: 2008; ASTM C1876-19; POLDER, 2000, 2001). A resistividade medida pelo método direto é chamada de resistividade elétrico-volumétrica, ou simplesmente resistividade volumétrica (REV). A resistividade medida pelo método direto é chamada de resistividade elétrico-volumétrica, ou simplesmente resistividade volumétrica (REV). A REV é a média da resistividade elétrica do tronco do corpo de prova (GHOSH; TRAN, 2015; POLDER, 2000, 2001; SPRAGG, 2011).

A configuração do método é apresentada na Figura 13, na qual ilustra-se uma amostra de concreto, com realce esquemático, em linhas tracejadas, dos possíveis caminhos os quais a carga elétrica pode percorrer através da microestrutura porosa do concreto.

FIGURA 13 – ESQUEMA CONCEITUAL DE FUNCIONAMENTO E MONTAGEM DO TESTE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA PELO MÉTODO DIRETO



FONTE: Giatec (2021).

No método direto, como demonstrado na Figura 13, a corrente elétrica é aplicada por uma fonte de corrente alternada, capaz de aplicar uma diferença de potencial em toda seção do corpo de prova. Por essa razão, os eletrodos devem possuir dimensão maior ou igual a área desta seção. Mede-se a corrente elétrica e a tensão. Pela lei de Ohm, determina-se a resistência da célula. Separadamente, repete-se o procedimento com os eletrodos encostados um no outro, sem o corpo de prova. Assim, encontra-se a resistência dos eletrodos. Da resistência da célula, subtrai-se a resistência dos eletrodos, tem-se a resistência do corpo de prova. A resistividade volumétrica do material é dada pela equação (2), ou seja, pelo produto da resistência do corpo de prova pela constante da célula. A constante da célula é dada pela equação (3), ou seja, o quociente da seção transversal pela altura do corpo de prova (ASTM C1876-19; LAYSSI, 2015; POLDER, 2000, 2001; SPRAGG, 2011).

2.4.3 Resistividade volumétrica extraída do RCPT

Para Torres-Acosta, Presuel-Moreno e Andrade (2019), o RCPT “[...] é, de fato, um teste de resistência elétrica no qual, ao invés de se fazer uma medida instantânea, a tensão é aplicada por seis horas” (tradução nossa). Os autores justificam a razão da afirmação no fato do RCPT seguir a lei de Ohm. Para Andrade e

Whiting (1996), o RCPT pode, comprovadamente, medir a resistividade elétrica do concreto.

Torres-Acosta, Presuel-Moreno e Andrade (2019), observaram que a correlação não foi influenciada pela variação de propriedades do concreto, tais como: tipo de cimento, MCS, aditivo, tipo de agregado. A variação do tipo de concreto, auto-adensável ou convencional pouco influenciaram na correlação. Dois tipos de cimento foram testados, com exemplares de idade entre 300 e 450 dias.

A resistividade volumétrica se relaciona à carga passante do RCPT, pela equação (5).

$$Q = \frac{20.400}{\rho} \quad (5)$$

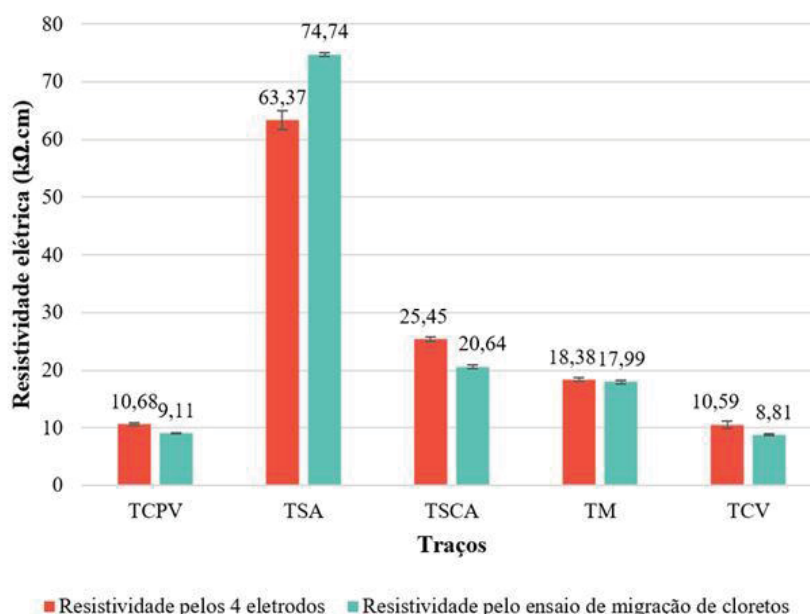
onde:

Q: carga passante (Coulombs);

ρ : REV (Ωcm) (TORRES-ACOSTA; PRESUEL-MORENO; ANDRADE, 2019).

Wosniack *et al.* (2021) mostraram que a REV pode ser extraída do RCPT pela lei de Ohm, pelo conceito de resistividade e pela constante da célula, aplicados às últimas seis leituras de corrente elétrica observadas durante o ensaio. Os dados foram tratados estatisticamente e comparados à RES obtida pelo método de Wenner. Cinco tipos de concreto foram testados, aos 28 dias de hidratação do cimento. A Figura 14 apresenta os resultados obtidos.

FIGURA 14 – COMPARAÇÃO ENTRE RES E REV EXTRAÍDA DO RCPT OBTIDAS DE DIVERSOS TRAÇOS



FONTE: Wosniack (2021).

Na Figura 14, observa-se que a maior discrepância está entre os resultados da mistura de sílica ativa. A análise estatística, segundo os autores, aponta que dentre as amostras comparadas, esta é a única que apresenta diferença estatisticamente significativa. Sendo assim, diferente de Torres-Acosta, Presuel-Moreno e Andrade (2019), Wosniack *et al.* (2021) limitam a condição de confiabilidade de cálculo da resistividade extraída do RCPT para concretos de resistividade abaixo de 80 kΩcm. Wosniack *et al.* (2021) observaram que resistividade extraída do RCPT é 5,31% maior do que a medida pelo método de Wenner, com R^2 igual a 0,93.

Além do RCPT, outro procedimento muito parecido, específico para fins de condutividade elétrica e REV foi descrito na norma ASTM C1760-12. A diferença mais significativa está no tempo de ensaio – enquanto no RCPT as tomadas de leitura são feitas a cada 30 minutos durante seis horas, neste uma tomada de leitura é feita no primeiro minuto após aplicação da carga na célula. Entretanto, a norma ASTM C1760-12 já foi revogada, de modo que não se encontra mais em vigor.

2.5 CORRELAÇÃO ENTRE RESISTIVIDADE ELÉTRICA E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Um estudo conduzido por Medeiros-Junior *et al.* (2019) comparou misturas de dois tipos de cimentos compostos, com teores de cinza volante de 12,5% e 27%, sob diferentes relações água/cimento. A RES foi tomada pelo método de Wenner, nos mesmos CP que foram levados ao teste de compressão simples. A Tabela 6 apresenta esses resultados.

TABELA 6 – RESULTADOS DE RC E RES DE CONCRETOS COM DIFERENTES RELAÇÕES ÁGUA/CIMENTO E DIFERENTES TEORES DE CINZA VOLANTE

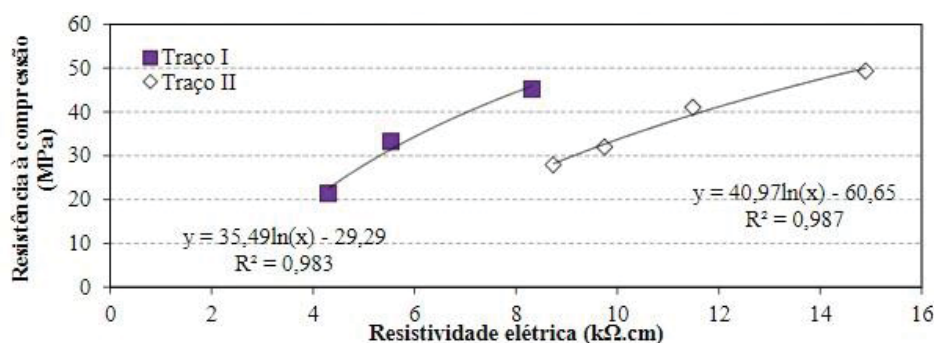
Código	Traço I			Traço II			
	B0,40	B0,50	B0,60	G0,42	G0,48	G0,54	G0,60
Resistividade elétrica (kΩcm)	8,3	5,5	4,3	14,9	11,5	9,7	8,7
Resistência a compressão (MPa)	45,2	33,2	21,4	49,3	41	32	27,9

FONTE: Medeiros-Junior *et al.* (2019)

Pode-se observar na Tabela 6, que a RES diminui junto com a resistência a compressão. Segundo os autores, isso se deve ao fato de que um dos impactos do incremento da relação água/cimento é o incremento da porosidade e da conectividade dos poros da microestrutura do concreto. Isso se reflete na diminuição da resistência mecânica e da resistividade elétrica.

Uma análise de variância ANOVA foi realizada para confirmar as diferenças entre os resultados apresentados na Tabela 6. O referido tratamento estatístico confirmou que os grupos amostrais apresentaram resultados distintos, de resistência a compressão e RES. Tal fato permite que os resultados sejam analisados graficamente. A Figura 15 apresenta as correlações gráficas obtidas para os dois grupos amostrais analisados.

FIGURA 15 – CORRELAÇÃO ENTRE RES E RC DE CONCRETOS COM DIFERENTES RELAÇÕES ÁGUA/CIMENTO E DIFERENTES TEORES DE CINZA VOLANTE



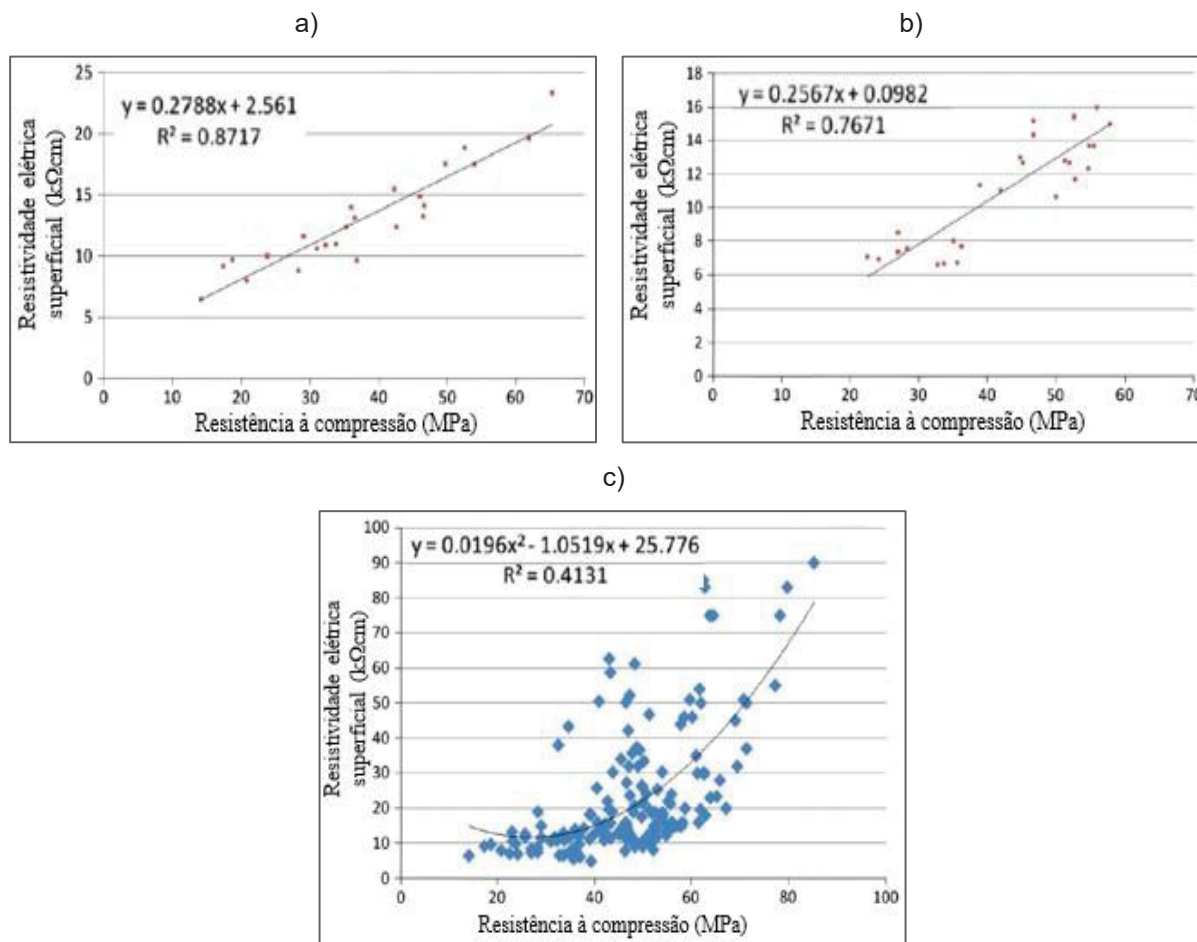
FONTE: Medeiros-Junior *et al.* (2019).

Na Figura 15, observa-se que os autores encontraram correlações com R^2 maiores de 0,98. A resistividade e a resistência à compressão cresceram juntas durante o tempo de observação da experiência. Ainda se destaca o fato de que a curva do Traço II, tem uma inclinação mais suave. De acordo com os autores, isso se deve ao fato do maior teor de MCS incrementar a densidade da microestrutura, o que é refletido na resistividade.

Ramezaniapour *et al.* (2011) encontraram correlações entre RC e RES de diversas combinações de misturas. Os autores ensaiaram 57 traços de concreto em que apenas um tipo de cimento foi usado. A RES foi medida pelo método de Wenner.

A Figura 16 mostra as correlações obtidas no estudo de Ramezaniapour *et al.* (2011). A análise das misturas simples, demonstrada na Figura 16(a), apresentou o maior coeficiente de determinação, R^2 maior que 0,8. Correlação pouco mais baixa entre RES e RC entre os resultados de misturas binárias, é demonstrada na Figura 16(b) e; ainda mais baixa entre os dados de todas as misturas, na Figura 16(c), com R^2 igual 0,4131.

FIGURA 16 – CORRELAÇÕES ENTRE RC E RES: a) MISTURAS SIMPLES; b) MISTURAS DE METACAU LIM; c) TODAS AS MISTURAS

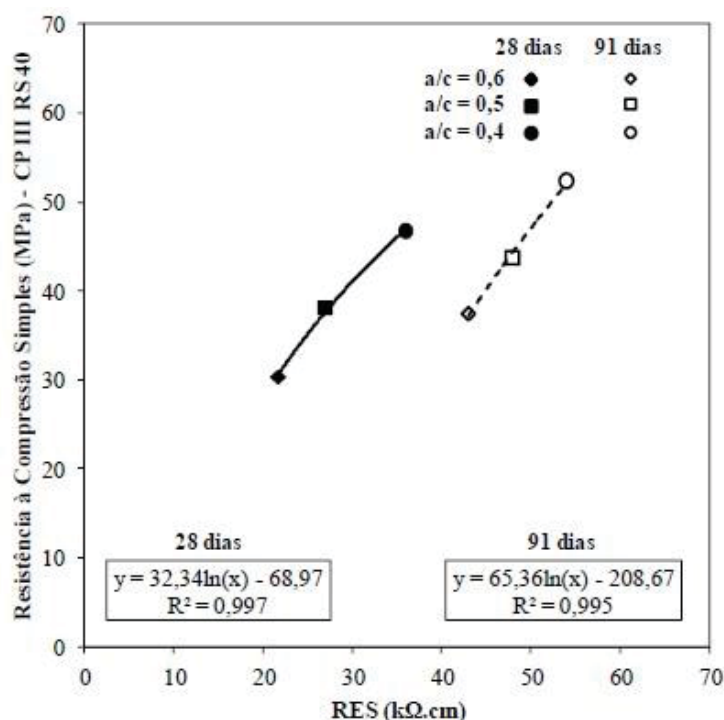


FONTE: Ramezaniapour et al. (2011).

Com restrições, Ramezaniapour et al. (2011), bem como, Medeiros-Junior et al. (2019) afirmam que há correlação entre a resistência à compressão e a resistividade elétrica no caso de concretos de composições similares. Entretanto, Os autores afirmam também que, de maneira geral, a RES é imprópria para ser usada como avaliação indireta da resistência à compressão. Também por este motivo, Medeiros-Junior et al. (2019) observam que tais análises de correlação devem ser feitas separadamente, por tipo de cimento.

Medeiros-Junior et al. (2019) estudaram correlações entre RES e resistência a compressão ao longo do tempo. Investigaram-se quatro tipos de cimento, sob três relações água/cimento, totalizando 12 amostras. A RES foi medida pelo método de Wenner aos 28 e 91 dias; a resistência à compressão, aos sete, 28 e 91 dias. A Figura 17 apresenta as correlações encontradas para as amostras de CP III RS 40.

FIGURA 17 – CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E RES, PARA CONCRETOS DE CIMENTO CP III RS 40, SOB TRÊS DIFERENTES RELAÇÕES ÁGUA/CIMENTO, AOS 28 E 91 DIAS DE TEMPO DE CURA



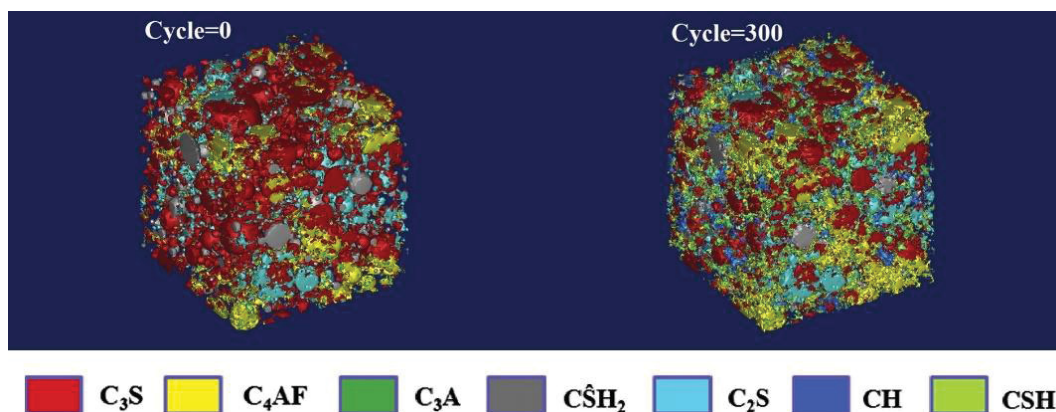
FONTE: Medeiros-Junior *et al.* (2019).

Observa-se na Figura 17, que há correlação entre as grandezas, apesar da limitação da pequena quantidade de amostras permitir conclusões precisas. Afirmam os autores que a RES tende a crescer junto com a resistência mecânica. Medeiros-Junior *et al.* (2014) fizeram as análises por tipo de cimento, com R^2 próximo de 1.

2.6 RELAÇÃO ENTRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA E A ESTRUTURA DE POROS DE PASTAS DE CIMENTO

Liu, Zhang e Jian (2014) consideram em seu trabalho a dinâmica da relação entre a difusividade dos íons cloreto e a estrutura de poros, ao longo do tempo. A resistividade do corpo, monitorada ao longo do tempo, foi comparada a uma simulação computacional de hidratação dos materiais cimentícios do concreto. De acordo com os autores, a monitoração da resistividade foi iniciada imediatamente após a moldagem; as leituras foram automaticamente gravadas por um computador, minuto a minuto, durante sete dias. Dois ciclos da simulação do experimento são ilustrados na Figura 18, retratando a mudança ocorrida entre o instante inicial e o instante 300 minutos.

FIGURA 18 – SIMULAÇÃO DE HIDRATAÇÃO



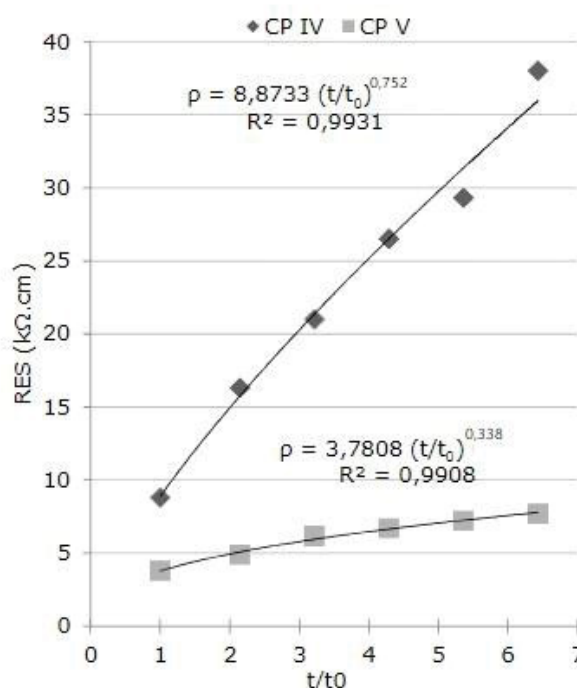
FONTE: Liu, Zhang e Jian (2014).

No desenvolver da hidratação ao longo do tempo, como se observa na Figura 18, de acordo com Liu, Zhang e Jian (2014), a fração de volume das fases minerais diminui, enquanto aumenta o volume dos produtos de hidratação.

Liu, Zhang e Jian (2014) concluem os autores que, no decorrer do desenvolvimento da hidratação de pastas de cimento, com a redução da relação água/aglomerante, a porosidade total diminui, enquanto o fator de tortuosidade aumenta. De acordo com os autores, a evolução da resistividade depende da estrutura de poros (capilares) e também das fases do C-S-H; pois, antes da primeira despercolação, ou descontinuidade, dos poros capilares, a concentração iônica da solução dos poros determina a resistividade do corpo de pasta. No decorrer do processo de hidratação, a redução da conectividade dos poros interfere na resistividade, muito mais do que o decréscimo da porosidade capilar, até o momento da completa despercolação dos poros capilares. Depois disso, uma fração de volume do C-S-H vai determinar a mudança de resistividade da pasta.

Medeiros-Junior e Gans (2017) consideram o impacto de MCS sobre a estrutura da matriz, quanto a composição química da solução presente nos poros e seu reflexo nas propriedades elétricas do concreto. Dois tipos de cimento foram usados, sendo eles o CP V ARI, e o CP IV 32 – este último com adição de até 50% de pozolana em sua composição; aquele, composto de no mínimo 95% de clínquer e sulfatos de cálcio. A Figura 19 apresenta a evolução da RES em função do tempo, para os dois tipos de cimento, obtidas no experimento.

FIGURA 19 – EVOLUÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL EM FUNÇÃO DO TEMPO, PARA DOIS TIPOS DE CIMENTO



FONTE: Medeiros-Junior e Gans (2017).

Na Figura 19 pode se observar que os valores de RES da mistura sem pozolana (CP V) são inferiores aos da mistura com pozolana, em todas as idades. A diferença observada na primeira idade, é de 2,3 vezes; na última, 4,9 vezes. De acordo com os autores, a finura dos cimentos tem influência sobre a resistividade. Espera-se que uma mistura de cimento mais fino, como o CP V apresente maior resistividade elétrica. Entretanto, a resistividade da mistura com o CP IV é maior porque o efeito da adição pozolânica, presente no CP IV, supera o efeito da finura do cimento, inerente ao CP V. Portanto o que explica os resultados apresentados na Figura 19 é o alto teor de pozolana da composição do CP IV (MEDEIROS-JUNIOR; GANS, 2017).

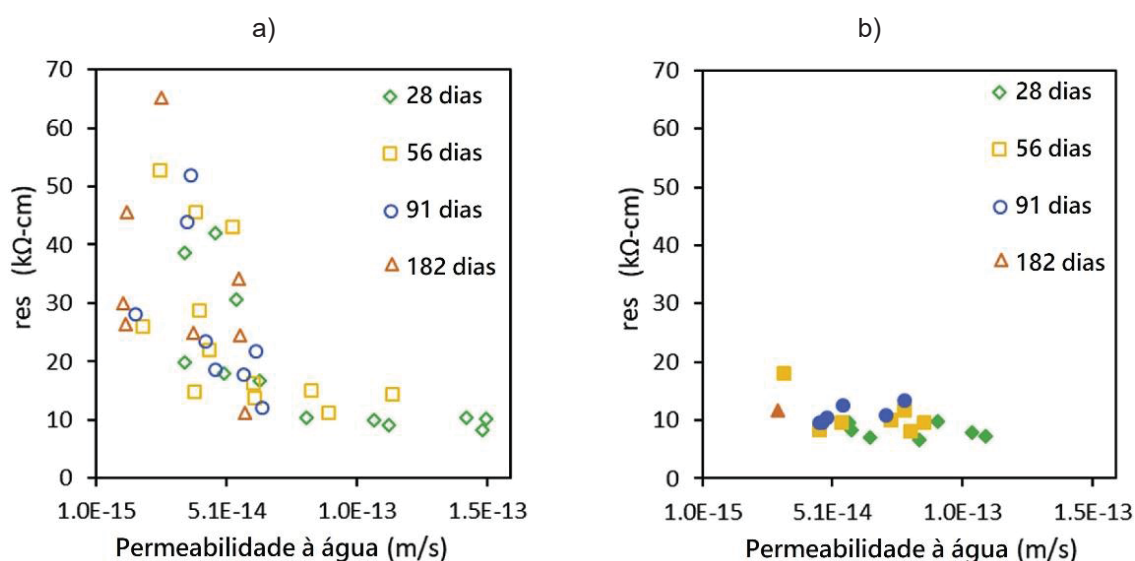
Nota-se na Figura 19, o aumento da magnitude da RES ao longo do tempo. Segundo Medeiros-Junior e Gans (2017) isso ocorre devido a evolução das reações de hidratação do cimento. Esse fato foi observado por Real (2015) e Andrade e d'Andrea (2011). Medeiros-Junior e Gans (2017) explicam que, a solução aquosa presente no concreto, em maior quantidade nas idades iniciais, proporciona um meio mais eficiente na condução de eletricidade.

Segundo Bijen (1996 *apud* MEDEIROS-JUNIOR; GANS, 2017), o efeito fíler, causado pela adição pozolânica, contribui com o aumento da densidade do concreto

e tortuosidade dos poros. Isso acontece quando partículas de diâmetro menor ou igual às partículas do clínquer são adicionadas ao sistema cimentício. Medeiros-Junior e Gans (2017) concluem que, o refinamento dos poros da microestrutura do concreto diminui a condutividade e aumenta a resistividade das amostras.

Tibbetts *et al.* (2020) usaram testes elétricos no concreto para se avaliar o efeito de MCS tradicionais sobre a permeabilidade a água. Os resultados dos testes elétricos foram comparados a um teste de permeação de água axial constante. Neste experimento, 19 traços foram investigados; os MCS alternativos empregados foram vidro moído e três tipos de cinza de bagaço de cana-de-açúcar; os MCS tradicionais foram: cinza volante, escória e metacaulim. A Figura 20 apresenta as correlações obtidas entre a RES e a permeabilidade a água das amostras, agrupadas em MCS tradicionais e MCS alternativos.

FIGURA 20 – CORRELAÇÕES ENTRE RES E PERMEABILIDADE A ÁGUA: a) CONCRETOS COMPOSTOS DE MCS CONVENCIONAIS; b) CONCRETOS COMPOSTOS DE MCS ALTERNATIVOS



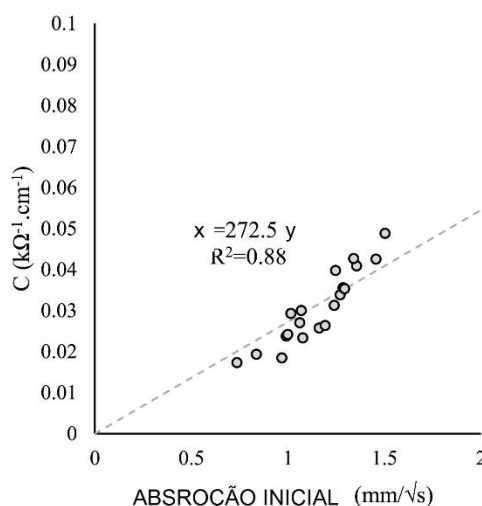
FONTE: Tibbetts *et al.* (2020).

Na Figura 20(a), demonstra-se o comportamento da RES em função da permeabilidade à água de traços compostos de MCS tradicionais, ao longo do tempo, dos traços compostos de MCS tradicionais, enquanto a Figura 20(b) demonstra a análise com os dos traços compostos de cinza de MCS alternativos. Os autores observaram que concretos com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e de vidro moído apresentaram menor RES em relação à RES dos MCS tradicionais. Em sua investigação, os autores concluíram que concretos com MCS alternativos, como

a cinza do bagaço da cana-de-açúcar e vidro moído, podem se comportar de maneira diferente em relação à permeabilidade a água devido a: (1) incremento de íons condutivos na composição da solução aquosa presente nos poros; (2) presença de sólidos condutivos na matriz da pasta endurecida. Enquanto concretos com MCS tradicionais, como metacaulim e cinza volante apresentam o comportamento de quanto maior a resistividade, menor sua permeabilidade a água.

Yadak Yaraghi *et al.* (2021) encontraram correlações favoráveis entre parâmetros de absorção de água e a condutividade elétrica do concreto (inverso da resistividade). Os autores testaram concretos compostos de argilas caulínicas calcinadas com baixo teor de caulinita. Seis traços com diferentes teores dessas argilas calcinadas foram comparadas a um traço de referência, sem MCS. A Figura 21 apresenta a correlação encontrada.

FIGURA 21 – ABSORÇÃO INICIAL X CONDUTIVIDADE

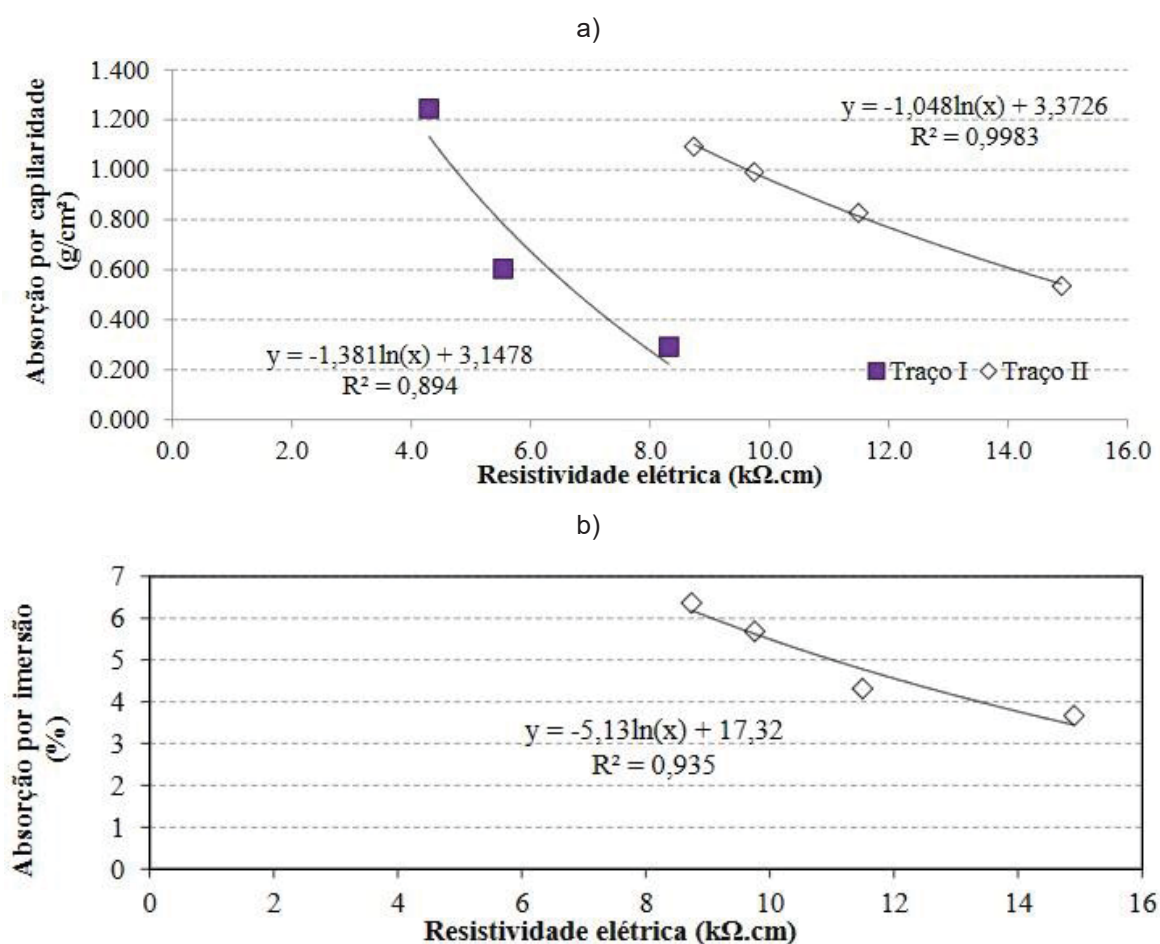


FONTE: Yadak Yaraghi *et al.* (2022)

De acordo com a Figura 21, a condutividade tem correlação diretamente proporcional com a absorção de água nos concretos testados por Yaraghi *et al.* (2021). Os autores ressaltam que a resistividade elétrica superficial poderia ser usada como parâmetro de avaliação da permeabilidade. Todavia, deve-se considerar que durante os testes de permeabilidade, nos quais o fluido penetrante é a água, os resultados de permeabilidade podem ser alterados. Da mesma forma, o emprego de MCS influencia nas propriedades condutivas da solução presente nos poros, o que pode alterar resistividade elétrica do concreto, de acordo com Ramezaniapour *et al.* (2011 *apud* YADAK YARAGHI, 2021).

Medeiros-Junior, Munhoz e Medeiros (2019) encontraram correlações favoráveis entre a resistividade elétrica superficial e parâmetros de absorção de água. Dois traços com teores de cinza volante respectivamente iguais a 12,5% e 27%, e diferentes relações água/cimento foram testados. A Figura 22 apresenta as correlações encontradas.

FIGURA 22 – CORRELAÇÕES – ABSORÇÃO DE ÁGUA E RES: a) ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE; b) ABSORÇÃO POR IMERSÃO



FONTE: Medeiros-Junior, Munhoz e Medeiros (2019).

A Figura 22(a) e a Figura 22(b) mostram que Medeiros-Junior, Munhoz e Medeiros (2019) encontraram correlações inversas entre a absorção de água e a resistividade do concreto. É possível observar que as amostras de menor resistividade elétrica apresentaram maior absorção de água. De acordo com os autores, isso se deve ao fato de que a maior quantidade de água absorvida na microestrutura do concreto proporciona um meio mais condutivo, de menor resistividade.

2.7 CORRELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DIRETO E DE WENNER

Para Morris, Moreno e Sagüés (1996), quando se usa o método de Wenner para medir a resistividade elétrica de um material homogêneo, de um corpo de superfície plana, com dimensões semi-infinitas, obtém-se a RES. Porém, para corpos de prova de concretos reais, não homogêneos e finitos, o resultado obtido pela aplicação do método é a RES aparente (MORRIS; MORENO; SAGÜÉS, 1996). Para uma laje de concreto, sem interferência da armadura, a RES aparente se aproxima da RES (MILLARD 1989 *apud* MORRIS; MORENO; SAGÜÉS, 1996).

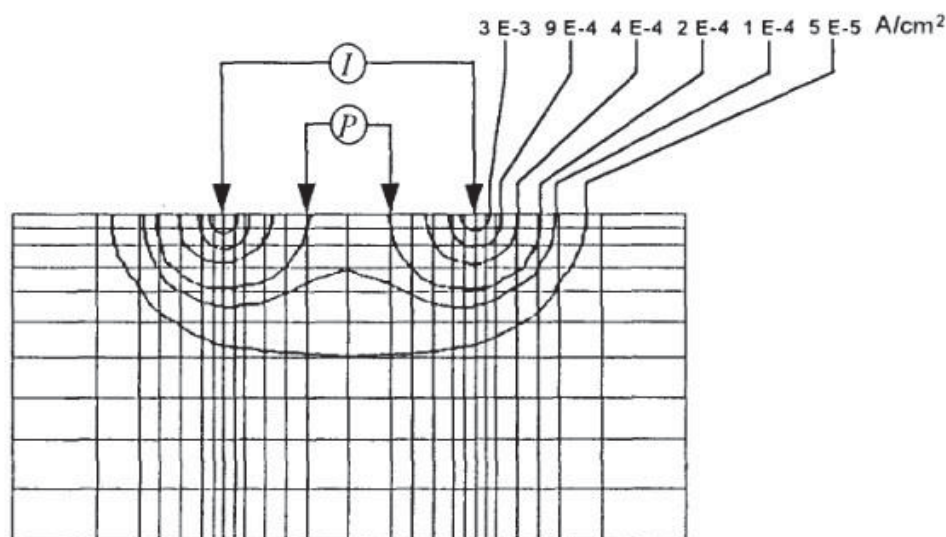
Para medições em elementos de concreto que não se enquadram como meio semi-infinito, através através da aplicação da constante de correção de célula, a RES aparente é transformada em RES. De acordo com a norma AENOR UNE 83988-2:2014, a constante de correção de célula, ou fator de forma, *“É o fator que relaciona a resistividade medida pelo método direto, com a medida com o método dos quatro pontos [...]”* (tradução nossa).

Para Ghosh e Tran (2015), a correlação teórica entre a resistividade medida pelos dois métodos é a própria constante de correção de célula (K) determinada por Morris, Moreno e Sagüés (1996). De acordo com a norma AENOR UNE 83988-2:2014, esta correlação é dada por um valor muito próximo de K^{-1} .

2.7.1 RES aparente

Na prática, a leitura obtida pelo método de medição de Wenner, é uma média da resistividade do material em teste. Morris, Moreno e Sagüés (1996), Minagawa *et al.* (2023) demonstram, através de simulação computacional por MEF, que a distribuição de corrente elétrica, durante a aplicação do método de Wenner, não é uniforme. Durante o ensaio de um corpo de prova cilíndrico, as linhas equipotenciais do campo elétrico se distribuem pelo material como se apresenta na Figura 23.

FIGURA 23 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS: SIMULAÇÃO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE WENNER, DE MEDIÇÃO DE RES

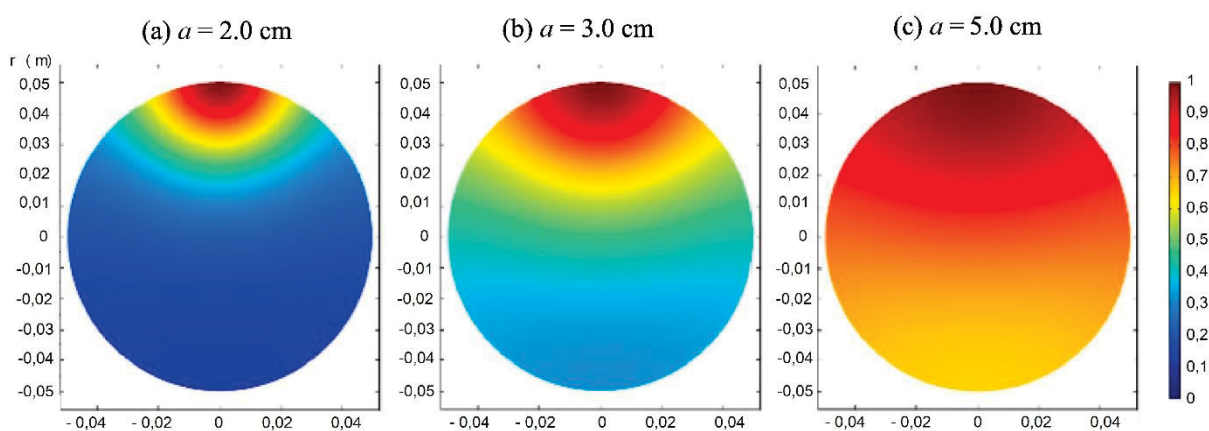


FONTE: Morris, Moreno e Sagüés (1996).

Na Figura 23 podem ser observadas a malha de elementos finitos, a distribuição das linhas equipotenciais do campo elétrico, pontos de aplicação de corrente e de medição de tensão, com a intensidade de corrente distribuída, em unidade de A/cm^2 , durante o ensaio de um corpo de prova submetido ao teste de Wenner.

A Figura 24 apresenta a distribuição da densidade de corrente, na seção transversal média de um corpo de prova submetido ao método de Wenner, obtida por MEF.

FIGURA 24 – DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DE CORRENTE DO MÉTODO DE WENNER PELA SEÇÃO DE UM CP: a) $a = 2.0$ cm; b) $a = 3.0$ cm; c) $a = 5.0$ cm



FONTE: Adaptado de Minagawa *et al.* (2023).

De acordo com a simulação pelo método dos elementos finitos, na Figura 24(a), em cuja distância “a”, entre eletrodos é de 2 cm, observa-se que valores de densidade de corrente elétrica superiores a 0,6 são encontrados na camada superficial de profundidade próxima de 2 cm. Analogamente, na Figura 24(c), em cujo distanciamento entre eletrodos é de 5 cm, observa-se que a profundidades aproximadamente iguais a 5 cm, a densidade de corrente elétrica é superior a 0,7.

Nas Figuras 23 e Figura 24 podem-se vislumbrar as conclusões de Morris, Moreno e Sagüés (1996) de que a resistividade medida tende a compreender a média da resistividade do material localizado entre os dois eletrodos centrais. Herman (2001), Morris, Moreno e Sagüés (1996) afirmam que a espessura aproximada da camada de material compreendida pela medição é aproximadamente igual ao espaçamento entre eletrodos.

2.7.2 Constante de correção de célula

Para compensar a diferença entre a RES aparente e a RES média do material, Morris, Moreno e Sagüés (1996) propõe uma constante de correção de célula, ou fator de forma, que correlaciona a resistividade do corpo de prova à resistividade aparente. Tal constante é função da geometria do arranjo experimental e é dado pela equação (6).

$$K = \frac{\rho_{ap}}{\rho} \quad (6)$$

onde:

K: constante de correção de célula;

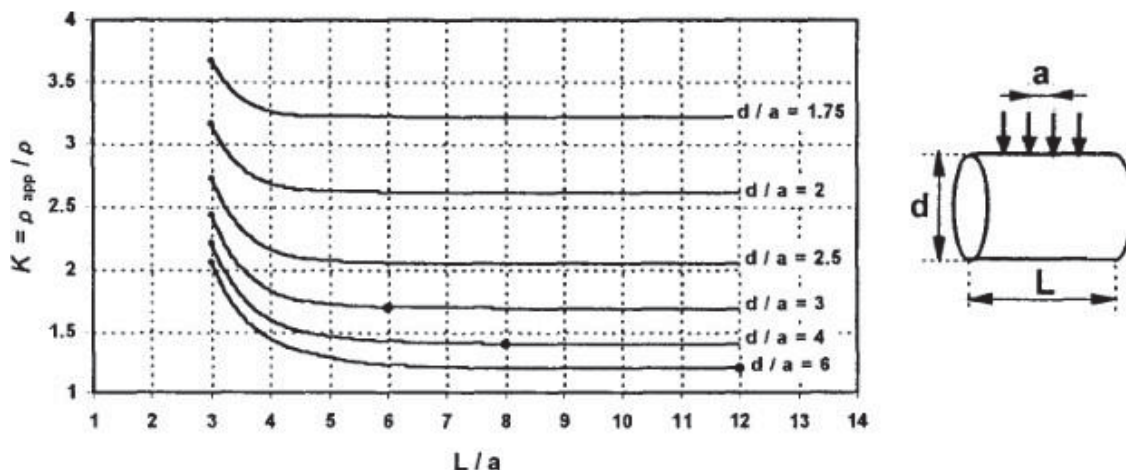
ρ_{ap} : RES aparente, medida;

ρ : resistividade do corpo de prova (MORRIS; MORENO; SAGÜÉS, 1996).

Valores de K foram determinados experimentalmente por Morris, Moreno e Sagüés (1996). Esses pesquisadores, usando uma sonda Wenner, mediram a resistividade de amostras de água contidas em recipientes cilíndricos, de dimensões iguais a corpos de prova de concreto. A resistividade da água era conhecida. Assim encontraram a correlação entre os valores de resistividade aparente e resistividade real. Corpos de prova de concreto foram ensaiados pelo método de Wenner e pelo método direto. Paralelamente, os autores simularam o experimento, computacionalmente, por MEF, obtendo maior amplitude de resultados.

A Figura 25 apresenta um ábaco que indica o valor da constante para o método de Wenner. Os dados de entrada são: a razão entre o diâmetro do corpo de prova e espaçamento dos eletrodos; e a razão entre o comprimento do corpo de prova e espaçamento dos eletrodos.

FIGURA 25 – ÁBACO DE MORRIS: CONSTATANTE DE CORREÇÃO DE CÉLULA, PARA O MÉTODO DE WENNER, EM FUNÇÃO DAS DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA E DO DISTANCIAMENTO DE ELETRODOS, PARA LEITURAS NA GERATRIZ DO CILINDRO DO CORPO DE PROVA



FONTE: Morris, Moreno e Sagüés (1996).

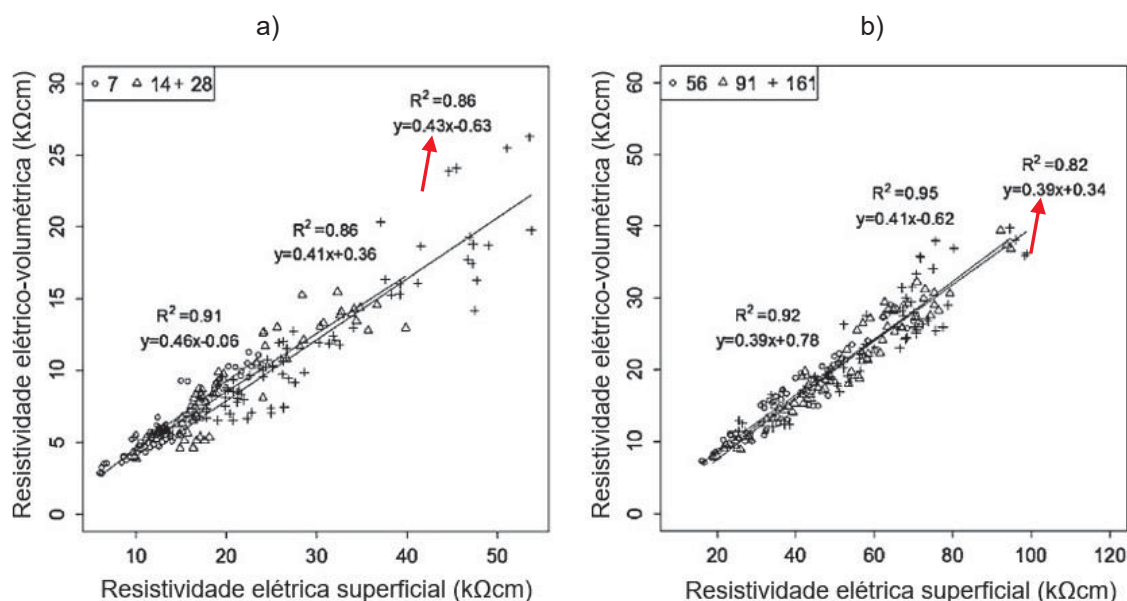
2.7.3 Constante de correção de célula: correlação entre o método direto e o de Wenner

Partindo das proposições de Morris, Moreno e Sagüés (1996), Ghosh e Tran (2015) calcularam razões teóricas entre resultados obtidos pelo método de Wenner e pelo método direto, comparando-os a resultados experimentais. O experimento foi realizado para concretos de alto desempenho, compostos de misturas binárias e ternárias, até a idade de cura de 161 dias. De acordo com os autores, as razões teóricas concordam com as experimentais.

A partir do ábaco da Figura 25, para uma configuração geométrica pré-determinada, Ghosh e Tran (2015) encontraram $K = 2,63$. Isso significa que, naquele experimento, a RES medida pela sonda Wenner, é 2,63 vezes maior do que a REV medida pelo método direto.

Experimentalmente, a constante de correção de célula foi dada por uma análise do intervalo do coeficiente angular de curvas experimentais. Algumas dessas curvas são apresentadas na Figura 26.

FIGURA 26 – CORRELAÇÃO ENTRE O MÉTODO DIRETO E O DE WENNER, PARA TRAÇOS COM SÍLICA ATIVA: a) AMOSTRAS COM IDADES DE CURA ENTRE SETE E 28 DIAS; b) AMOSTRAS COM IDADES DE CURA ENTRE 56 E 161 DIAS



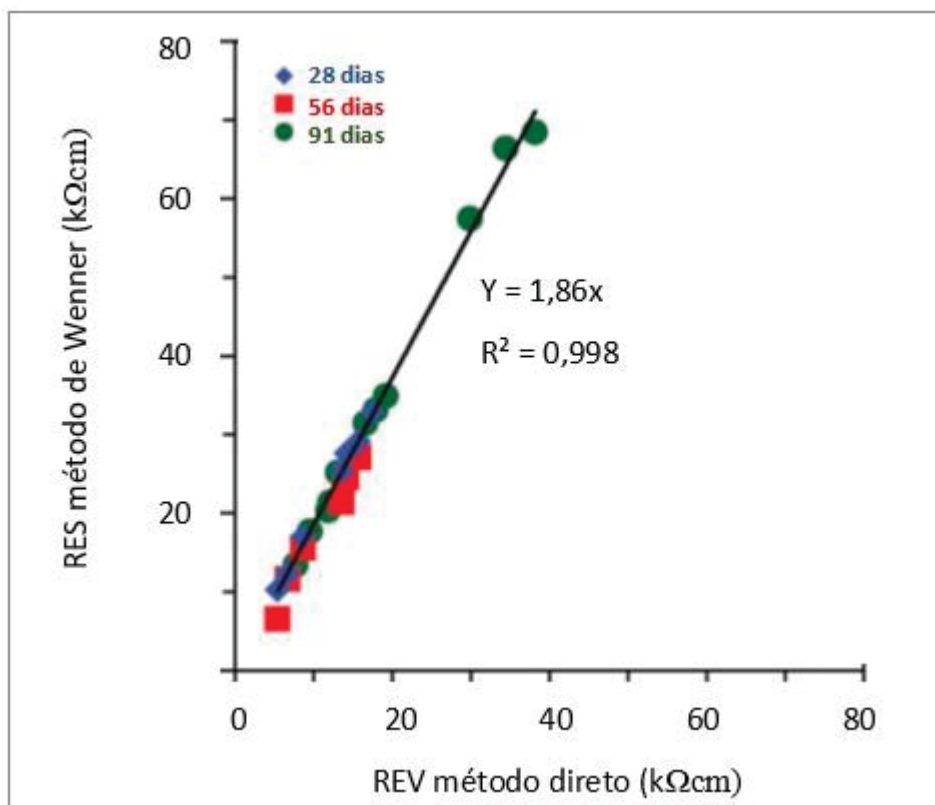
FONTE: Ghosh e Tran (2015).

Na Figura 26 destacam-se as equações das linhas de tendência dos traços com sílica ativa, com valores de coeficiente angular iguais a 0,43 a 0,39. Esses valores são os extremos do intervalo experimental de Ghosh e Tran (2015). Observa-se que a razão inversa de K teórico, $1/2,63 = 0,38$, está contida no intervalo, por isso, concluem os autores que o valor teórico é satisfatório. Segundo os autores, os extremos do intervalo experimental são muito próximos do valor teórico. O coeficiente de variação entre as correlações encontrado no experimento foi de 17,4%.

Morris, Moreno e Sagüés (1996), validaram as correlações teóricas através de experimento, no qual foram tomadas medidas de RES de nove cilindros de concreto, pelo método de Wenner. Aplicadas as correções propostas pelos próprios autores, os resultados apresentaram desvio médio inferior a 6% das medições obtidas pelo método direto.

Spragg (2011) realizou um experimento interlaboratorial, no qual testou 12 tipos de concreto em 12 laboratórios, encontrando uma correlação entre os resultados do método direto e do método de Wenner. A figura 27, na qual cada ponto corresponde à média de uma amostra composta por três corpos de prova, apresenta a correlação encontrada pelo autor.

FIGURA 27 – CORRELAÇÃO ENTRE O MÉTODO DIRETO E O DE WENNER

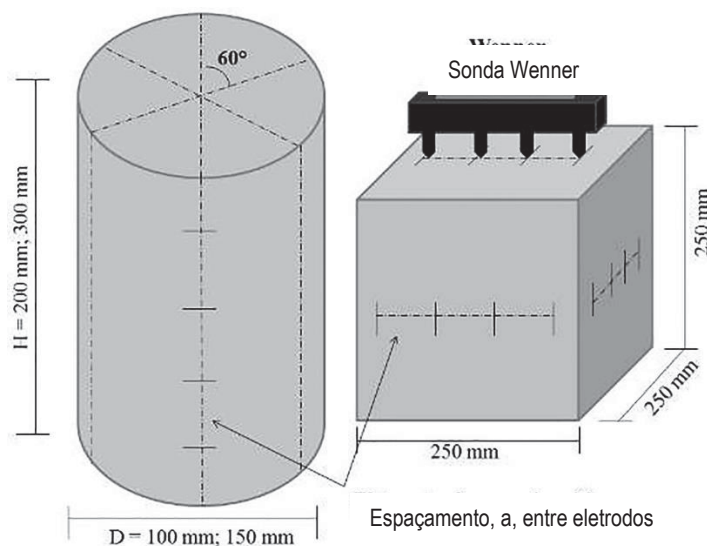


FONTE: Spragg (2011).

Na Figura 27, de acordo com Spragg (2011), observa-se a constante de correção de célula igual a 1,86. Segundo o autor, esse resultado, em função da geometria do corpo de prova e do espaçamento entre eletrodos, está de acordo com a proposta de Morris, Moreno e Sagüés (1996) que é aproximadamente igual a 1,9.

Araújo, Macioski e Medeiros (2022) obtiveram de forma experimental, outros valores da constante de correção de célula ao comparar leituras tomadas pelo método de Wenner em corpos de prova de diferentes dimensões. A leitura de referência foi tomada sobre corpos de prova grandes o suficiente, que simularam sólidos ideais, com superfície plana e dimensões que não interferem na distribuição das corrente elétrica no corpo de prova. A Figura 28 apresenta a geometria e a dimensão dos corpos de prova e, os pontos de tomada de leitura. O espaçamento entre eletrodos utilizado, a , foi igual a 5 cm. Cilindros de dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm (diâmetro x altura) foram utilizados.

FIGURA 28 – GEOMETRIA, DIMENSÕES E PONTOS DE TOMADA DE LEITURA DE RES EM DIFERENTES CORPOS DE PROVA DE CONCRETO



FONTE: Araújo, Macioski e Medeiros (2022).

Na Figura 28 observam-se os pontos de tomada de medição, nos cilindros e no cubo. No cilindro, a RES foi medida nas geratrizes, a cada 60°; no cubo, no centro, uma em cada face. O distanciamento entre os eletrodos e a borda do cubo, durante a tomada de medição, é no mínimo igual ao espaçamento entre os eletrodos. Isso está de acordo com as observações de Gowers e Millard (1999) para que os limites do corpo de prova não interfiram na distribuição do potencial elétrico, simulando-se uma leitura ideal, sobre uma superfície plana, em um sólido de dimensões semi-infinitas. Sendo assim, não é necessário corrigir a leitura pela constante de correção de célula.

Os valores da constante de correção de célula propostos por AENOR UNE 83988-2:2014, como também por Araújo, Macioski e Medeiros (2022), são listados na Tabela 7.

TABELA 7 – CONSTATANTE DE CORREÇÃO DE CÉLULA DE ACORDO COM A NORMA AENOR UNE 83988-2:2014 E COM ARAÚJO, MACIOSKI E MEDEIROS (2023)

Distância entre eletrodos	35 mm	50 mm	
		UNE	ARAÚJO, MACIOSKI E MEDEIROS
Geometria dos corpos de prova \ Autor	UNE		
CP cilíndrico 300 mm x 150 mm	0,714	0,606	0,802
CP cilíndrico 200 mm x 100 mm	0,571	0,377	0,547
CP cilíndrico 150 mm x 75 mm	0,384	-	
CP prismático 40 mm x 40 mm x 160 mm	0,172	-	

FONTE: O autor (2023).

Pode-se observar na Tabela 7, que os valores normativos são aproximadamente iguais a K, obtido no ábaco de Morris, Moreno e Sagüés (1996), ao inverso, ou seja, K^{-1} .

Para Ghosh e Tran (2015), a correlação teórica entre a resistividade medida pelos dois métodos é a própria constante de correção de célula (K) determinada por Morris, Moreno e Sagüés (1996).

2.8 VARIABILIDADE DOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

12 tipos de concreto foram testados por Spragg *et al.* (2011), em 12 laboratórios, a diferentes idades de cura. Dentro de cada um dos laboratórios foi estimado o coeficiente de variação (CV) dos resultados. Isso retrata a componente de variância dentro de um determinado laboratório. A Tabela 8 apresenta a média dos CV e a precisão do método direto, segundo Spragg *et al.* (2011).

TABELA 8 - VARIABILIDADE MÉDIA E ÍNDICE DE PRECISÃO DO MÉTODO DIRETO

Tempo de cura (dias)	Coeficiente de variação (%)		Índice de precisão (%)	
	Unilaboratorial	Interlaboratorial	Unilaboratorial	Interlaboratorial
28	3,84	7,75	9,44	21,93
56	3,87	9,83	10,94	27,82
91	4,36	13,22	12,34	37,38

FONTE: Spragg *et al.* (2011).

Observa-se na Tabela 8, que a variabilidade aumenta com o tempo. Isto posto, a máxima diferença esperada, aos 91 dias, entre dois testes executados no mesmo laboratório, é de 12,34% da média. Resultados similares foram obtidos por Jackson (2011 *apud* SPRAGG, 2011). Spragg *et al.* (2011) concluem que, dentro de um laboratório, observando-se o protocolo de execução do teste, o fator de variabilidade é atribuído a erros do operador, do equipamento e do material testado. Paralelamente, o incremento do coeficiente de variação em função do tempo é atribuído a possíveis variações de condição de cura ocorridas.

Os coeficientes de variação e índices de precisão expostos na norma ASTM C1876-19 concordam com os valores observados na Tabela 8, aos 91 dias de tempo de cura.

A RES, segundo Polder *et al.* (2000, 2001) a variabilidade é inerente às medições, mesmo em dados do mesmo grupo amostral, de mesma exposição. Para medições repetidas, um coeficiente de variação de 10% é considerado bom; de 20%, é normal. Em campo é possível ocorrer erros de 25%. Entretanto, a norma AENOR UNE 83988-2:2014, observa uma repetibilidade de 10% e reproducibilidade de 26%.

De acordo com a norma ASTM C1202-19, para o RCPT, observa-se um coeficiente de variação de 12,3% e precisão de 34%, para um operador, no mesmo laboratório. Para um teste multilaboratorial, espera-se um coeficiente de variação de 18% e precisão de 51%.

A Tabela 9 apresenta uma compilação de dados de variabilidade dos métodos de Wenner, direto e da REV extraída do RCPT, de acordo com diversas referências.

TABELA 9 – VARIABILIDADE DE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO CONCRETO

Referência	Aplicação	Coeficiente de variação	Precisão
Spragg et al.(2011)	REV unilaboratorial	4,36%	12,34%
Spragg et al.(2011)	REV multilaboratorial	13,22%	37,28%
ASTM C1876-19	REV unilaboratorial	4,3%	12%
ASTM C1876-19	REV multilaboratorial	13,2%	37%
Polder (et al 2000, 2001)	RES (bom!)	10%	-
Polder (et al 2000, 2001)	RES (normal)	20%	-
Polder (et al 2000, 2001)	RES (em campo)	25%	-
AENOR UNE 83988-2:2014	RES	10%	26%
ASTM C1202-19	RCPT	12,3%	34%
ASTM C1202-19	RCPT	18%	51%
Morris, Moreno e Sagüés (1996)	RES x REV	-	6%*
Ghosh e Tran (2015)	RES x REV	17,4%	-

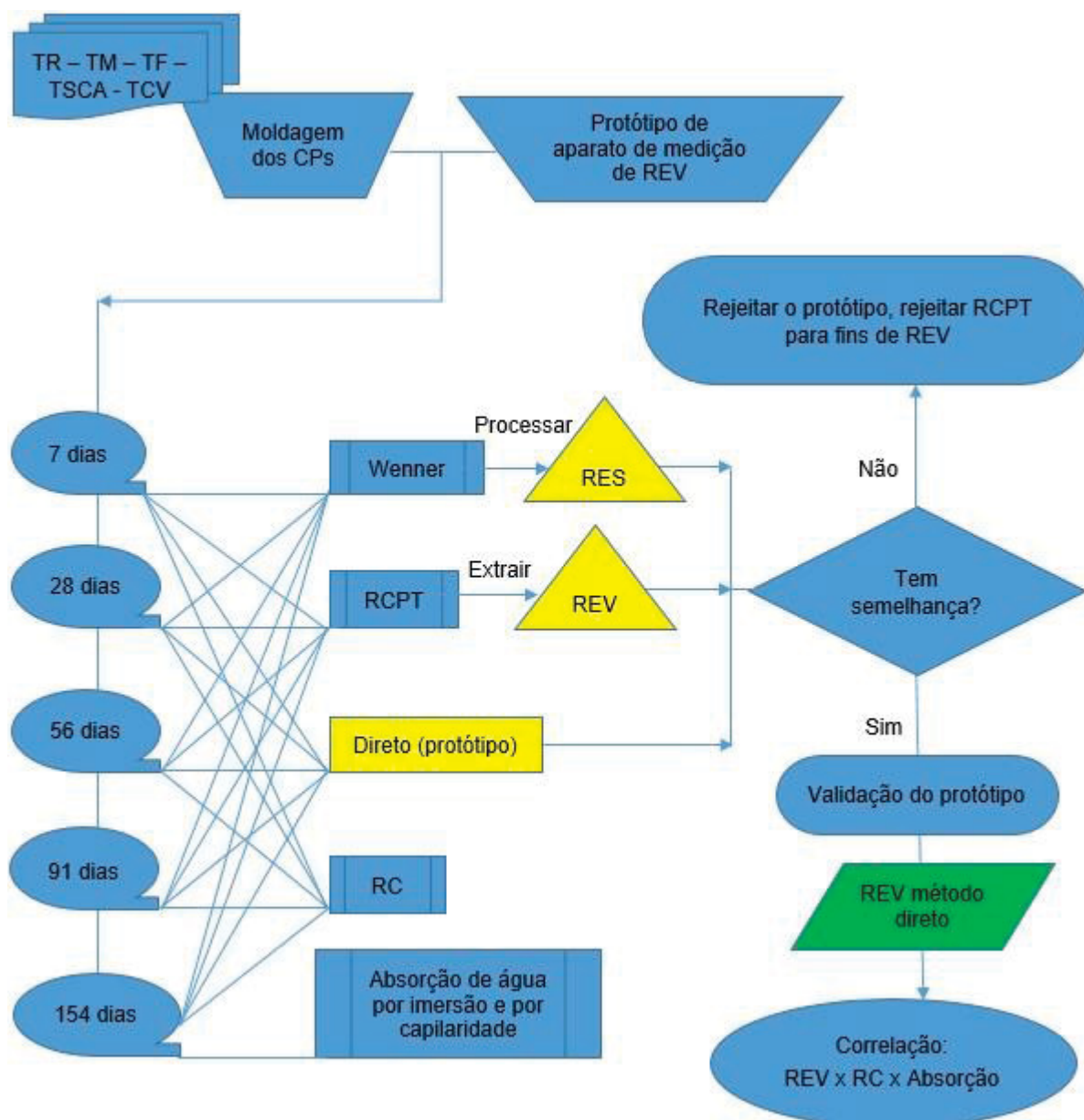
NOTA - * desvio médio máximo encontrado entre o método de Wenner e o método direto

FONTE: O autor (2023).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O fluxograma da Figura 29 permite a identificação dos principais elementos do programa experimental e suas etapas. Um cronograma por tempo de hidratação do concreto, formação das amostras, dimensões dos corpos de prova e testes realizados é apresentado no Quadro 3, no Apêndice 1.

FIGURA 29 – FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL



FONTE: O autor (2023).

De acordo com a Figura 29, cinco amostras de concreto foram confeccionadas, denominadas: TR, TM, TF, TSCA e TCV. Foram moldados os corpos de prova enquanto um protótipo para medição de REV pelo método direto era desenvolvido.

Aos sete dias, 28 dias, 56 dias, 91 dias e 154 dias de idade de cura, as amostras foram submetidas a testes de: RES, pelo método de Wenner; RCPT; REV pelo método direto, através protótipo que era desenvolvido e RC. Testes de absorção de água por imersão e por capilaridade foram realizados apenas ao 154 dias de idade de cura. A RES foi processada a partir dos dados obtidos pelo método de Wenner. A REV foi extraída do RCPT, como também foi obtida pelo método direto. Os resultados dos três métodos de medição de resistividade elétrica foram comparados comparados. Caso não fosse encontrada semelhança, tanto o protótipo, como o RCPT para fins de REV, poderiam ter sido rejeitados. A semelhança entre os resultados validou o protótipo, como também validou o RCPT para fins de REV. A REV obtida pelo método direto foi então tomada como parâmetro para se encontrar as correlações entre REV, RC e absorção de água.

Provisoriamente, o método de Wenner foi tomado como de referência até a etapa de validação do protótipo. Depois disso, as respostas de REV obtidas pelo método direto foram tomadas como medidas de referência para as demais análises. Todos os dados, imediatamente depois de coletados foram submetidos a testes de validade e modelos estatísticos, antes de quaisquer outras análises.

3.1 VARIÁVEIS DA PESQUISA E PARÂMETROS FIXADOS

3.1.1 Proporções de mistura

Cinco tipos de concreto foram utilizados neste trabalho, todos dosados com a mesma proporção de mistura de agregados e relação água/aglomerantes igual a 0,41.

A proporção de mistura de referência foi dosado com um cimento do tipo CP V-ARI, sem outro tipo de aglomerantes. Os traços com presença de MCS são derivados do traço de referência, com algum teor de substituição do cimento pelos respectivos MCS. O traço com presença de fíler calcário foi dosado exclusivamente com um cimento do tipo CP II-F-32, porque este já contém fíler calcário em sua composição. A Tabela 10 detalha os níveis de variação de composição e proporção de mistura dos traços.

TABELA 10 - PROPORÇÕES DE MISTURA UNITÁRIAS

Traço	Cimento	MCS	Areia	Brita	Água	Aditivo	MCS
TR	1	-	2,13	2,67	0,400	0,008	≥ 10% fíler calcário
TF	1	-	2,13	2,67	0,402	0,006	11% ≤ fíler calcário ≤ 25%
TCV	0,75	0,25	2,13	2,67	0,401	0,007	25% Cinza volante
TSCA	0,90	0,10	2,13	2,67	0,402	0,006	10% Sílica de casca de arroz
TM	0,90	0,10	2,13	2,67	0,400	0,008	10% Metacaulim

FONTE: O autor (2023).

Como se pode ver na Tabela 10, os teores de substituição de cimento variam entre os traços. Não há variação na soma das proporções de água e aditivo nos mesmos traços.

Além da maneira descrita anteriormente, os traços também podem ser entendidos da seguinte forma:

- a) TR: traço de referência, aglomerante composto de cimento CP V ARI, sem adições;
- b) TF: traço com substituição de 100% do CP V-ARI por cimento CP II-F 32;
- c) TCV: traço com 25% de substituição do CP V-ARI por cinza volante;
- d) TSCA: traço com substituição de 10% do cimento CP V-ARI por sílica de casca de arroz;
- e) TM: traço com substituição 10% do cimento CP V-ARI por metacaulim.

O procedimento de moldagem foi feito como se observa na norma ABNT NBR 5738:2015. A cura foi do tipo submersa em solução saturada de hidróxido de cálcio, desde o instante do desmolde, até o momento do ensaio.

Para fins de prolongar o tempo de consistência adequada, como para mantê-la constante entre as diferentes misturas (na faixa de 90 mm a 110 mm), utilizou-se o aditivo ADVA FLOW 880 da GCP Applied Technologies. O aditivo é um redutor de água tipo 2, RA2, de acordo com ABNT NBR 11768-1:2019.

3.1.2 Caracterização dos cimentos

Os tipos de cimento utilizados neste trabalho são parâmetros mantidos constantes, reservados a suas respectivas aplicações. São eles o cimento tipo CP V-ARI e o cimento tipo CP II-F-32. A Tabela 11 informa as características químicas do cimento CP V-ARI e do cimento CP II-F-32.

TABELA 11 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS CIMENTOS

Características químicas (%)	CP V-ARI	Características químicas (%)	CP II-F-32
CaO	62,23	CaO	61,25
SiO ₂	19,03	SiO ₂	18,45
Al ₂ O ₃	4,56	Al ₂ O ₃	4,16
MgO	3,32	Fe ₂ O ₃	2,85
Fe ₂ O ₃	2,97	SO ₃	2,52
SO ₃	2,56	MgO	2,26
CaO livre	0,87	CaO livre	1,46
Perda ao fogo	3,16	Perda ao fogo	7,03
Resíduo insolúvel	1,04	Resíduo insolúvel	0,83
Equivalente alcalino	0,73	Equivalente alcalino	0,63

FONTE: Itambé (2022).

A Tabela 12 apresenta as características físicas do cimento CP V-ARI e do cimento CP II-F-32.

TABELA 12 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS CIMENTOS

Características físicas	CP V-ARI*	CP II-F-32**
Massa específica (g/cm ³)	3,09	3,06
Expansibilidade a quente (mm)	-	1,00
Tepo de pega (min)	Início	180
	Fim	225
Consistência normal (%)	29,0	25,8
Finura Blaine (cm ² /g)	4400	3480
Finura nas peneiras (%)	#200	0,06
	#325	0,40
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	26,3
	3 dias	38,7
	7 dias	45,4
	28 dias	55,4

NOTA – *adição ≤ 10% fíler calcário;

**11% ≤ adição ≤ 25% fíler calcário.

FONTE: Itambé (2022).

Observa-se na Tabela 12 que, no cimento CP V-ARI o teor máximo de adição de fíler calcário é de 10 %. P, este tipo de cimento é o mais puro disponível no mercado. Portanto, foi o cimento escolhido para composição do traço de referência

deste trabalho. O cimento CP II-F-32 é um dos mais comuns no mercado nacional, seu teor de adição de fíler calcário varia entre 11% e 25%.

3.1.3 Caracterização dos materiais cimentícios suplementares

Três MCS ativos foram usados no programa experimental. A Tabela 13 mostra a composição química dos MCS, obtida utilizando-se a técnica de fluorescência de raios-X.

TABELA 13 – ANÁLISE QUÍMICA DOS MCS POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

Composição química (%)	Cinza volante	Metacaulim	Sílica de casca de arroz
SiO ₂	58,0	53,9	88,94
Al ₂ O ₃	20,4	36,0	2,42
Fe ₂ O ₃	6,5	2,6	0,11
CaO	5,8	0,1	1,10
K ₂ O	3,0	1,6	4,18
TiO ₂	1,1	1,6	-
MgO	1,0	0,5	-
SO ₃	0,7	-	2,08
Na ₂ O	0,7	0,2	-
P ₂ O ₅	0,1	0,1	0,24

FONTE: O autor (2023).

A atividade pozolânica foi investigada com auxílio de duas técnicas, a saber: difração de raios-X, no estado anidro e; Chapelle modificado (NBR 15.895:2010). A Tabela 14 demonstra os resultados obtidos com o método Chapelle modificado.

TABELA 14 – ATIVIDADE POZOLÂNICA PELO MÉTODO CHAPELLE MODIFICADO

Material cimentício suplementar	Atividade pozolânica (mg Ca(OH)₂/g amostra)
Sílica de casca de arroz	1.336,0
Metacaulim	660,5
Cinza volante	237,5

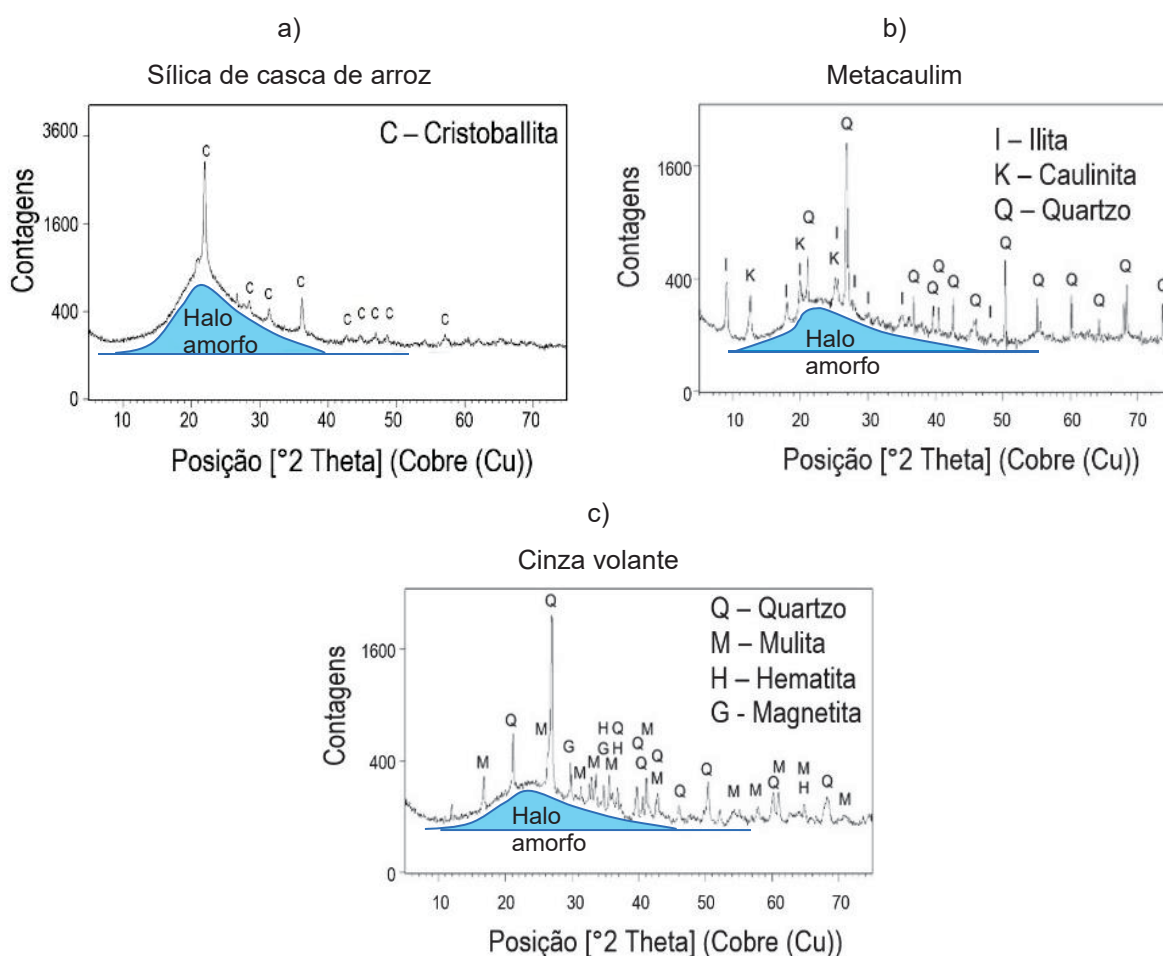
Fonte: O autor (2023).

De acordo com a Tabela 14, a sílica de casca de arroz pode ser classificada como um MCS de alta reatividade pozolânica, de acordo Souza (2016), por apresentar atividade pozolânica superior a 1.100 mg de hidróxido de cálcio por grama de amostra.

O metacaulim apresentou atividade pozolânica superior ao limite de 436 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por grama de pozolana, estipulado por Raverdy *et al.* (1980, *apud* HOPPE FILHO, 2008) para ser considerado um material pozolânico. Por outro lado, a cinza volante pode ser classificada como um material não pozolânico, com baixa reatividade.

Na Figura 30 apresentam-se os respectivos difratogramas dos MCS, obtidos pela técnica de difração de raios-X.

FIGURA 30 – DIFRATOGRAMAS DOS MCS: a) SÍLICA DE CASCA DE ARROZ; b) METACAU LIM; c) CINZA VOLANTE



FONTE: O autor (2023).

Na Figura 30, o halo amorfo, característico de estrutura vítrea, está destacado e pode ser identificado nas três amostras. Na Figura 30(a), referente à amostra de sílica de casca de arroz, observam-se picos referentes à cristobalita (SiO_2), uma das formas polimórficas do dióxido de silício. O difratograma do metacaulim, na Figura 30(b), apresentou picos característicos de quartzo, caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e illita ($((\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})])$). Por sua vez, a cinza volante, Figura

30(c), apresentou picos de quartzo (SiO_2), mulita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), magnetita (Fe_3O_4) e hematita (Fe_2O_3).

3.1.4 Caracterização dos agregados

Uma areia média, natural, extraída na região metropolitana de Curitiba foi utilizada como agregado miúdo. O agregado graúdo foi composto de uma brita basáltica, com dimensão máxima de agregado igual a 19 mm, extraída na região metropolitana de Curitiba. Antes de sua aplicação, os agregados foram secos em estufa por um tempo mínimo de 24 horas, a 100°C . A Tabela 15 informa os parâmetros de caracterização desses agregados.

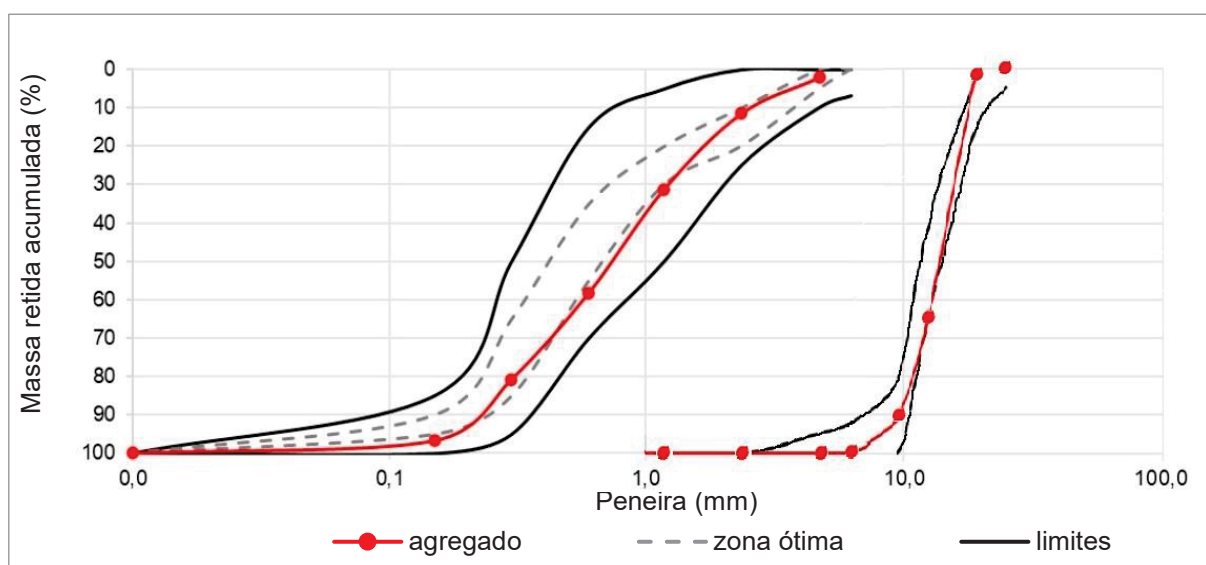
TABELA 15 – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

	Massa unitária (g/cm ³)	Massa específica (g/cm ³)	Massa específica SSS (g/cm ³)	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 (2023).

A Figura 31 ilustra as respectivas curvas granulométricas do agregado miúdo e do agregado graúdo, em relação aos limites da norma ABNT NBR NM 248:2003.

FIGURA 31 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS MIÚDO E GRAÚDO



FONTE: Adaptado de Voigt (2023).

3.1.5 Variáveis independentes e variáveis dependentes

As variáveis independentes e seus respectivos níveis de variação necessários para atender aos objetivos desta pesquisa são informados na Tabela 16.

TABELA 16 - VARIÁVEIS INDEPENDENTES

Variável independente	Níveis de variação
X1: Método de medição de resistividade	Wenner, direto e REV extraída do RCPT
X2: Composição dos aglomerantes do traço	Uma sem adição e quatro, com adições diferentes
X3: Tempo de hidratação do cimento (dias)	Sete dias, 28 dias, 56 dias, 91 dias e 154 dias

FONTE: O autor (2023).

De acordo com a Tabela 16 as variáveis independentes são: os métodos de medição de resistividade elétrica; a composição de aglomerantes do traço; e o tempo de hidratação do cimento. O método de medição de resistividade possui três níveis de variação; a composição de aglomerantes possui quatro; e o tempo de hidratação do cimento, cinco. Os níveis de variação da composição de aglomerantes do traço e seus componentes foram detalhados na Tabela 10.

A variação dos métodos de medição de resistividade elétrica permitiu se identificar um modelo de correlação entre eles. Essa correlação encontrada validou os resultados obtidos pelo aparato construído neste trabalho, para medição de REV. A variação da composição de aglomerantes possibilitou avaliar a influência dos MCS sobre a resistividade elétrica e demais parâmetros de durabilidade abordados neste trabalho.

A Tabela 17 apresenta as variáveis dependentes, com suas respectivas unidades de medida.

TABELA 17 - VARIÁVEIS DEPENDENTES

Variável dependente	Unidade de medida
Y1: Resistividade elétrica superficial (RES)	Ωm
Y2: Resistividade volumétrica pelo método direto (REV)	Ωm
Y3: Resistividade pelo RCPT	Ωm
Y4: Resistência à compressão (f_{c28})	MPa
Y5: Resistência à penetração de cloretos	Coulombs
Y6: Absorção por imersão	%
Y7: Índice de vazios	%
Y8: Absorção por capilaridade	g/cm^2

FONTE: O autor (2023).

3.2 PROTOCOLOS DE ENSAIOS

Com exceção de dois dos ensaios, os demais foram conduzidos de acordo com protocolos normativos. Os ensaios e respectivos protocolos experimentais são apresentados na Tabela 18.

TABELA 18 – ENSAIOS UTILIZADOS NESTE EXPERIMENTO

Ensaio	Protocolo	Número de corpos de prova	Observação
Resistividade elétrica superficial (RES)	AENOR UNE 83988-2:2014	6	-
Resistividade volumétrica, pelo método direto (REV)	ASTM C1876-19	6	Modificado material constituinte dos eletrodos
Resistividade pelo RCPT	ASTM C1202-19	4	Processamento de obtenção de resultados adaptado
Resistência à penetração de cloretos	ASTM C1202-19	4	-
Resistência à compressão	ABNT NBR5739:2018	6	-
Absorção por imersão e índice de vazios	ABNT NBR9778:2005	2	-
Absorção por capilaridade	ABNT NBR9779:2012	2	-

FONTE: O autor (2023).

Os ensaios, como listados na Tabela 18, foram executados para cada uma das amostras de concreto que fizeram parte do programa experimental. Deve-se notar que no caso da REV pelo método direto, houve uma modificação do metal utilizado para os eletrodos. No caso, os eletrodos são de alumínio, enquanto a norma ASTM C1876-19 prescreve aço inoxidável. Além disso, existe uma adaptação importante no processamento do resultado do ensaio RCPT, que não é destinado a ter como resultado a REV. Neste caso, a lei de Ohm e o conceito de resistividade elétrica foram aplicados para se chegar na REV – procedimento este, que também está sendo testado neste trabalho de pesquisa.

Nesta descrição experimental, optou-se por não detalhar os ensaios considerados de apoio às interpretações das medições de resistividade elétrica, que são a resistência à compressão axial (NBR 5739:2018), absorção de água por imersão (NBR 9778:2005) e absorção de água por capilaridade (NBR 9779:2012). Tomou-se este caminho por se considerar que são ensaios executados estritamente de acordo

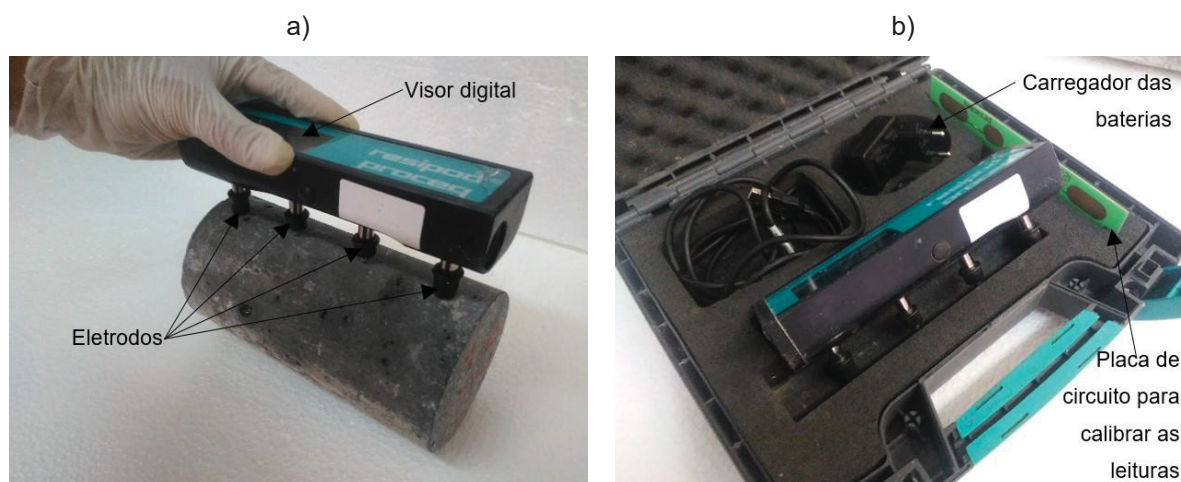
com as suas respectivas normas, não sendo necessário o detalhamento neste documento.

3.2.1 Procedimento de execução do método de Wenner

As leituras foram tomadas instantes depois dos corpos de prova serem retirados do tanque de cura, na condição de saturados com superfície seca, de acordo com prescrição normativa da AENOR UNE 83988-2:2014. 72 horas antes do ensaio, a cura submersa foi feita em ambiente temperatura controlada de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Utilizou-se um equipamento disponível no mercado, da marca Proceq, modelo Resipod, para tomada de medição de RES pelo método de Wenner. Cada amostra foi composta por seis corpos de prova cilíndricos, de dimensões 100 mm x 200 mm (diâmetro x comprimento). Multiplicou-se cada leitura pela constante de correção de célula, de 0,377, conforme a Tabela 7. Depois se fez a transformação de unidades, de $\text{k}\Omega\text{cm}$ para Ωm . A Figura 32 mostra uma tomada de leitura e o equipamento utilizado.

FIGURA 32 – RESISTIVÍMETRO PARA MÉTODO DE WENNER: a) DURANTE UMA TOMADA DE LEITURA; b) ESTOJO E ACESSÓRIOS



FONTE: O autor (2023).

Na Figura 32(a), um corpo de prova, apoiado sobre uma superfície não condutiva, é testado. A leitura foi tomada na posição ortogonal em relação à superfície do corpo de prova, na geratriz do cilindro. A leitura se estabilizava no visor digital, na unidade de $\text{k}\Omega\text{cm}$, poucos segundos depois de se pressionar o dispositivo contra o corpo de prova. Na Figura 32(b), visualiza-se o dispositivo e acessórios

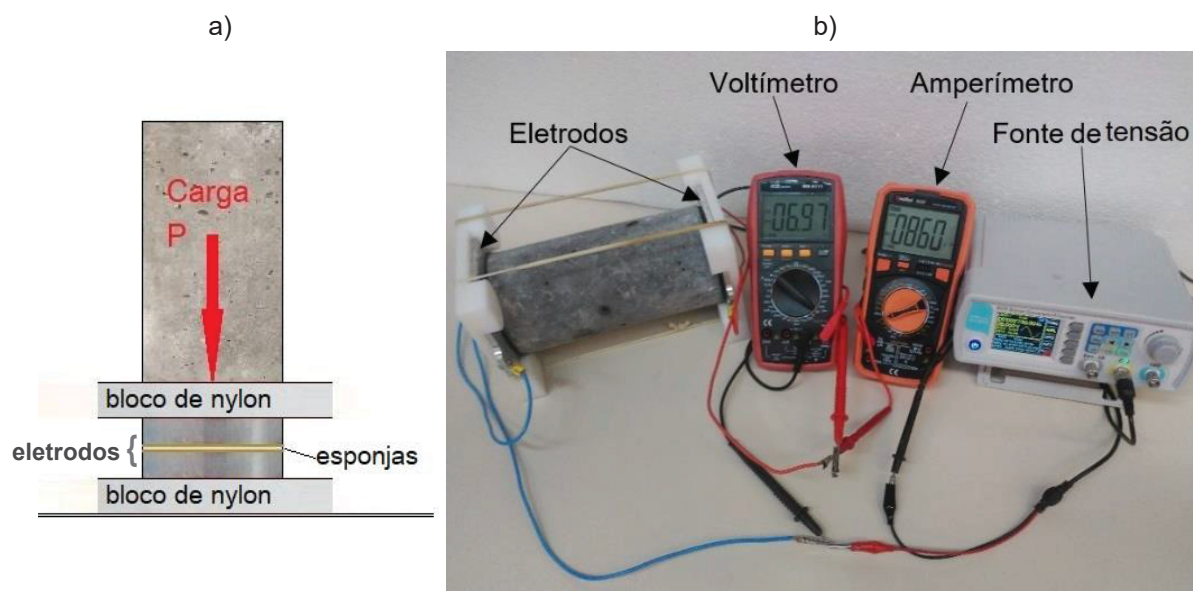
como: a placa de circuito para aferição da calibração, cabos e carregador de baterias, em seu estojo.

3.2.2 Procedimento de execução do método direto

As medidas de REV foram tomadas de acordo com a norma ASTM C1876-19, com auxílio de um aparato construído neste trabalho, para esse fim. Nas 72 horas predecessoras ao ensaio, os corpos de prova eram transferidos para um outro tanque de cura em ambiente com temperatura controlada de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. O teste foi executado pouco tempo depois da retirada dos corpos de prova do tanque de cura. No momento do ensaio os corpos de prova encontravam-se na condição de saturados com superfície seca.

Cada amostra foi composta de seis corpos de prova. Tomaram-se duas medidas por corpo de prova. Para se fazer a segunda medição, trocava-se a posição dos eletrodos, um pelo outro. A Figura 33 demonstra a tomada de medição.

FIGURA 33 – EXECUÇÃO DO MÉTODO DIRETO: a) CONFIGURAÇÃO PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DOS ELETRODOS; b) CONFIGURAÇÃO PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DO CORPO DE PROVA JUNTO COM OS ELETRODOS



FONTE: O autor (2023).

A Figura 33(a) ilustra um esquema de montagem do aparato para se determinar da resistência dos eletrodos. Nessa primeira etapa os eletrodos foram pressionados um contra o outro. As esponjas umedecidas, foram posicionadas entre as placas de alumínio. Na Figura 33(b) demonstra-se como o aparato foi montado para se

determinar a resistência do corpo de prova, junto com os eletrodos. Os eletrodos foram pressionados contra as superfícies do corpo de prova com uma pressão equivalente a da recomendação normativa (ver Figura 5). Em seguida, subtraiu-se a resistência encontrada na primeira etapa, da segunda. O resto dessa operação de subtração é a resistência elétrica do corpo de prova, que aplicada à equação (3), resulta na REV.

O aparato construído possibilitou a leitura direta da tensão e da intensidade de corrente elétrica, não fornecendo a leitura direta da REV. Sendo assim, a REV foi calculada pela aplicação da lei de Ohm, de acordo com a equação (1), seguida da aplicação do fator geométrico, de acordo com a equação (2.) A REV foi calculada de acordo com a equação (3). Nesse processo, as medidas de intensidade de corrente elétricas foram computadas em mili Amperes, as de tensão em Volts e as dimensões dos corpos de prova em milímetros. Isso forneceu resultado em unidade de Ohms metro.

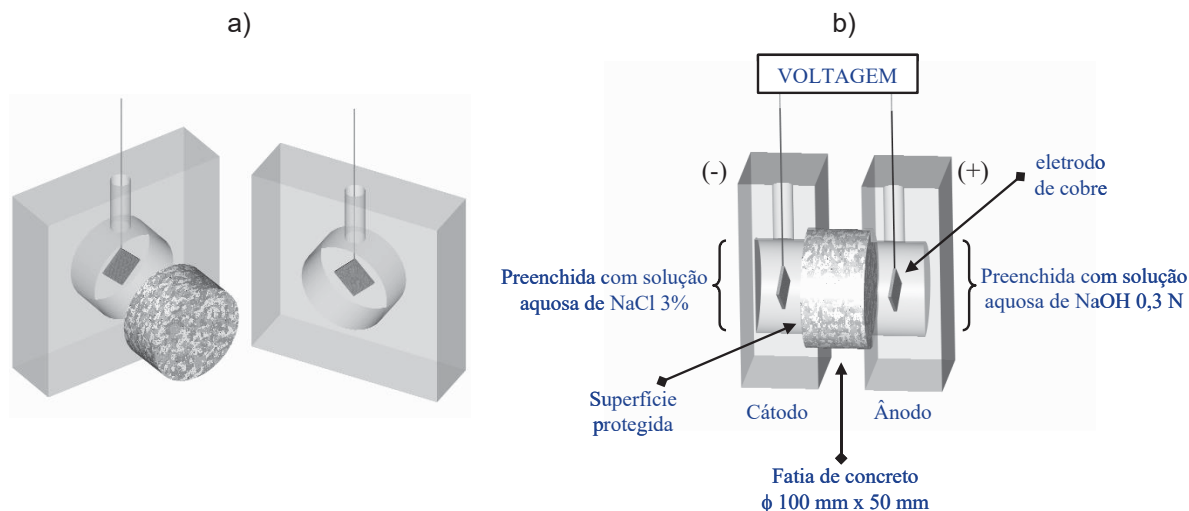
As médias quadráticas (*True-RMS*) da tensão e da intensidade de corrente foram dadas pelos multímetros observados na Figura 33(b). O gerador de funções, que funcionou como fonte de tensão, foi regulado para gerar sinais de onda senoidal, na frequência igual a 700 Hz, em conformidade a Tabela 2, de acordo com Spragg *et al.* (2013), bem como, ASTM C1876-19, e amplitude de onda igual a 20 Vpp.

3.2.3 Resistividade volumétrica extraída do RCPT

3.2.3.1 Descrição do RCPT

Duas câmaras estanques são montadas e seladas às faces planas do corpo de prova, uma delas é preenchida com NaCl em solução aquosa e a outra, com NaOH em solução aquosa. A aceleração da permeação de íons cloreto se dá pela aplicação de uma voltagem de 60 VDC entre os polos. Os corpos de prova são preparados especialmente para o ensaio. Depois da preparação, procede-se com o acoplamento dos corpos de prova nas câmaras estanques de acrílico, enchimento das câmaras com as respectivas soluções eletrolíticas e a conexão elétrica. A Figura 34 ilustra um esquema de montagem do arranjo experimental.

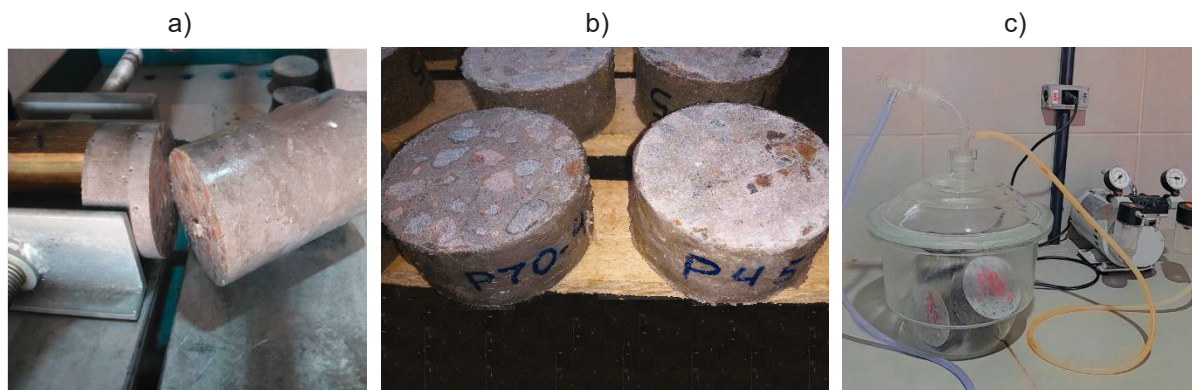
FIGURA 34 – FUNCIONAMENTO DO RCPT: a) PERSPECTIVAÇÃO EXPLODIDA DA CÉLULA; b) CORTE LONGITUDINAL DA CÉLULA



FONTE: Medeiros, Hoppe Filho e Helene (2009).

Algumas das etapas de preparação dos corpos de prova necessárias antes da montagem do teste são apresentadas na Figura 35.

FIGURA 35 – PREPARAÇÃO DO TESTE RCPT: a) CORTE; b) PROTEÇÃO E IMPERMEABILIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE; c) SATURAÇÃO

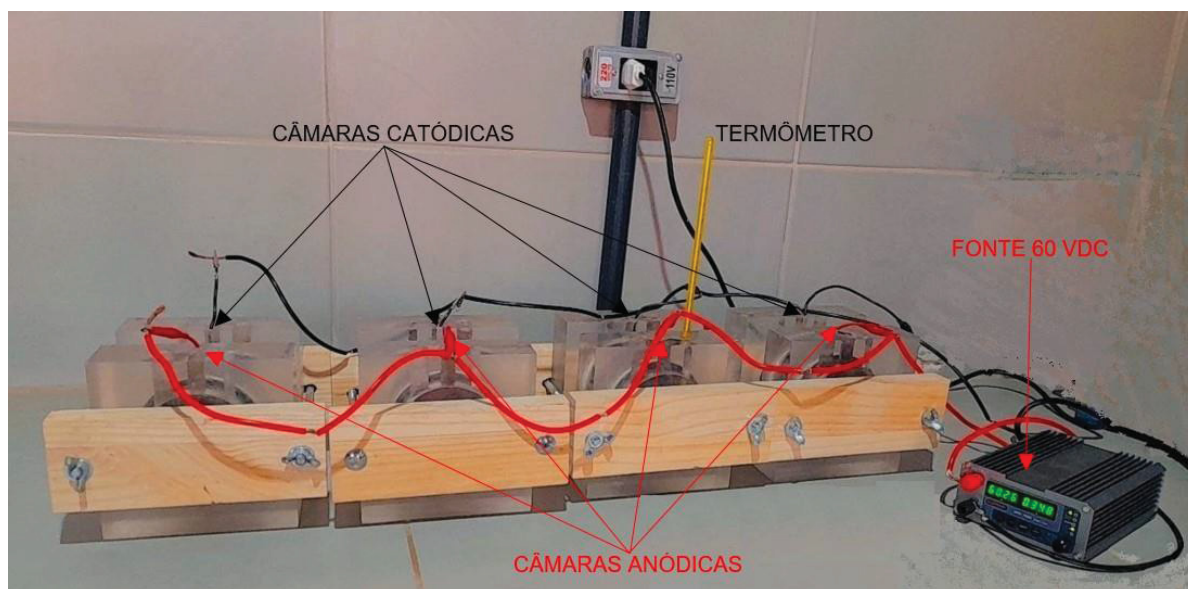


FONTE: O autor (2023).

A preparação dos corpos de prova consiste em corte dos cilindros de concreto, como observado na Figura 35(a), impermeabilização de suas superfícies convexas externas, Figura 35(b), saturação com auxílio de câmara de vácuo, Figura 35(c). Depois disso os corpos de prova são acoplados às células.

A Figura 36 apresenta os elementos do arranjo experimental durante a execução do ensaio, com quatro células ligadas em paralelo. Essa configuração permite que quatro corpos de prova sejam testados simultaneamente. Neste caso, todos os corpos de prova pertenciam à mesma amostra, ou seja, o mesmo traço de concreto.

FIGURA 36 – MONTAGEM DAS CÉLULAS DE TESTE DO RCPT



FONTE: O autor (2023).

A intensidade de corrente em cada célula foi tomada a cada 30 minutos, a partir do primeiro instante até 360 minutos da aplicação da tensão de 60VDC entre os polos das células. A quantidade de carga elétrica passante por corpo de prova, durante esse tempo, foi calculada. O valor médio dos quatro corpos de prova foi tomado como parâmetro de avaliação da resistência da amostra à penetração de cloretos.

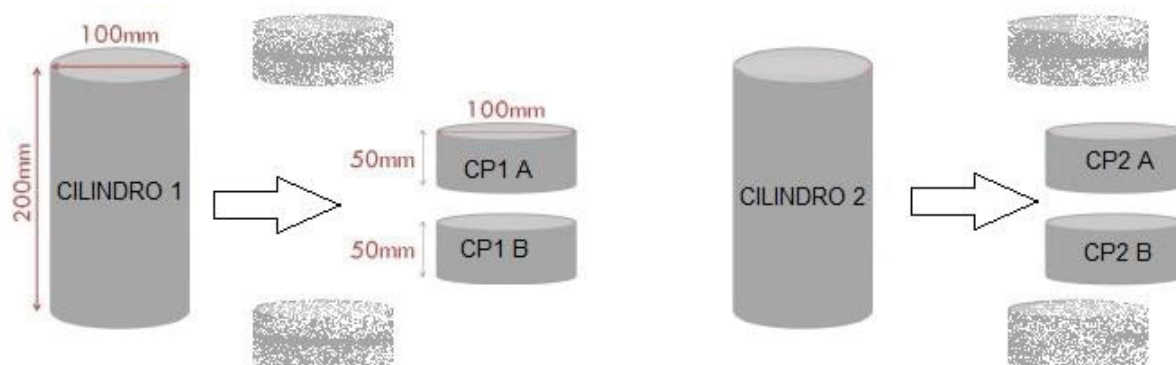
3.2.3.2 Cálculo da REV extraída do RCPT

A adaptação proposta para o ensaio RCPT é, a partir dos valores das leituras de intensidade de corrente elétrica, calcular a REV. Portanto, a lei de Ohm, conforme a equação (1) foi aplicada a cada um dos valores dessas leituras. Logo em seguida, o fator geométrico foi considerado conforme a equação (2) e depois, os valores de REV foram obtidos pela equação (3). A média dos valores de REV obtidos dessas leituras, foi tomada como a REV média do traço.

Durante a realização dos testes RCPT, o protocolo experimental de tomada de leituras foi executado como prescrito na norma ASTM C1202-19. Quatro corpos de prova do mesmo traço foram testados simultaneamente. Conforme a prescrição normativa, foram tomadas 14 leituras de corrente elétrica por corpo de prova, totalizando 52 leituras por traço, por teste. Os testes foram realizados aos sete dias, 28 dias, 56 dias, 91 dias e 154 dias de hidratação do cimento.

A Figura 37 demonstra como foi formada uma amostra e como foram extraídas as fatias dos cilindros de concreto para preparação dos corpos de prova do ensaio RCPT.

FIGURA 37 – EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA O ENSAIO RCPT



FONTE: Adaptado de Real (2015).

Quatro fatias cilíndricas de espessura 50 mm e diâmetro 100 mm foram extraídas, duas a duas, do mesmo tipo de concreto, como se observa na Figura 37. Um resultado médio de REV foi obtido de cada fatia. Esses dados foram tratados estatisticamente a fim de se calcular a REV média da amostra.

3.3 TESTES DE VALIDADE E MODELO ESTATÍSTICO

3.3.1 Testes de validade

A Tabela 19 apresenta as fontes de coleta de dados, tamanho das amostras, quantidade de dados obtidos, justificativas da escolha e a precisão esperada.

TABELA 19 - TESTES DE VALIDADE

Continua			
Fonte de coleta de dados	Tamanho da amostra	Justificativa da escolha	Precisão esperada
Método de Wenner	6 CPs	Fornece 36 dados. Há registros de sucesso com 30 (REAL, 2015) e com 32 (GHOSH E TRAN, 2014)	Repetibilidade $\leq 10\%$ (AENOR UNE 83988-2:2014) CV $\leq 17,4\%$ (GHOSH E TRAN, 2014)
Método direto	6 CPs	Fornece 12* dados Há registros de sucesso com 6 (SPRAGG et al., 2011)	CV $\leq 4,3\%$, precisão 12% (ASTM C1876-19 e SPRAGG et al., 2011)

Conclusão			
Fonte de coleta de dados	Tamanho da amostra	Justificativa da escolha	Precisão esperada
Resistividade pelo RCPT	4 CPs	Fornece 52 dados (WOSNIACK,2021)	Adotado igual ao RCPT ($\leq 12,3\%$)
RCPT	4 CPs	Comumente utilizam-se 3 (ASTM C1202, 2019)	CV $\leq 12,3\%$, precisão 34%** (ASTM C1202-19)
Resistência à compressão simples	6 CPs	Há registros de sucesso com 6 dados (REAL, 2015)	CV $\leq 7\%$ é excelente para concretos com $f_c > 35$ MPa (ACI 214 R11(2011)) Sd $\leq 4,0$ para condição de preparo A (ABNT NBR 12655:2022)
Absorção por imersão e índice de vazios	2 CPs	Conforme requisito normativo (ABNT NBR9778, 2005)	-
Absorção por capilaridade	3 CPs	Conforme requisito normativo (ABNT NBR9779, 2012)	CV $\leq 10\%$ (REAL, 2015)

NOTA : * Mede-se duas vezes cada corpo de prova

** Precisão inter-laboratorial.

FONTE: O autor (2023).

Os limites de precisão unilaboratoriais observados na Tabela 19, foram usados nos casos de eliminação de dados espúrios dentro do ensaio, como também nos casos de comparação entre diferentes testes. A formação das amostras e quantidade de corpos de prova informados na Tabela 19 são apresentados de forma mais detalhada no Quadro 3, do Apêndice 1. As dimensões dos corpos de prova são apresentadas na Tabela 29, no Apêndice 1.

3.3.2 Modelo estatístico

Além dos limites de precisão, observados na Tabela 19, o critério de Chauvenet, a análise de variância ANOVA e o teste de Tukey foram escolhidos como métodos de validação. Isso tem como meta minimizar os erros de parcialidade de avaliação de resultados. Dessa forma, resultados de grupos distintos, podem ser julgados estatisticamente distintos ou não.

O critério de Chauvenet garantiu que a probabilidade m , de obter um determinado desvio em relação à média, seja menor do que $1/2n$ (OLIVEIRA, 2008). Sendo assim, os dados espúrios, pertencentes aos grupos de resultados das n leituras de cada ensaio, foram rejeitados pelo critério de Chauvenet. Os dados

remanescentes, automaticamente, pertencem a uma distribuição normal. A ANOVA, com 95% de significância e o teste de Tukey permitiu distinguir grupos estatisticamente distintos.

Feito o tratamento estatístico, as correlações entre a resistividade elétrica e os demais parâmetros foram analisados graficamente, com curvas de regressão.

3.4 MÉTODOS DE ANÁLISE DE RESULTADOS

As ferramentas de análise estatística são as mesmas para todos os casos. O que diferencia é a combinação dos grupos de dados, com os parâmetros variáveis do processo. Os resultados foram agrupadas, por traço, da forma como se apresenta na Tabela 20.

TABELA 20 - AGRUPAMENTO DE DADOS AMOSTRAIS PARA ANÁLISE DE RESULTADOS

Tempo de hidratação do cimento	Resistência à Compressão	RCPT	Resistividade elétrica superficial (RES)	Resistividade volumétrica (REV)	Resistividade pelo RCPT
7 dias	6 dados	4 dados	36 dados	12 dados	4 dados
28 dias	6 dados	4 dados	36 dados	12 dados	4 dados
56 dias	6 dados	4 dados	36 dados	12 dados	4 dados
91 dias	6 dados	4 dados	36 dados	12 dados	4 dados
154 dias	6 dados	4 dados	36 dados	12 dados	4 dados

FONTE: O autor (2023).

Paralelamente à composição de aglomerantes, a Tabela 20 mostra que os grupos amostrais foram formados em função do tempo de hidratação do cimento. As médias amostrais dos grupos de:

- resistência à compressão, dadas pela média de seis dados;
- resistência à penetração de cloretos, média de quatro dados;
- RES, média de trinta e seis dados;
- REV, média de 12 dados;
- resistividade pelo RCPT, média de quatro dados.

Antes de se obter o resultado médio da amostra, dados espúrios foram descartados por limites de precisão esperados descritos na Tabela 9 e pelo critério de Chauvenet. Resultados possivelmente incoerentes foram analisados separadamente através de análise ANOVA e teste de Tukey. Descartaram-se os dados dos casos em que essa incoerência foi confirmada.

3.4.1 Correlação entre diferentes técnicas de medição de resistividade elétrica

A Tabela 21 apresenta o tratamento estatístico dado às variáveis de resposta, ao caso de se correlacionar os diferentes métodos de medição de resistividade elétrica.

TABELA 21 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DADO EM FUNÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

Qual é a correlação entre as diferentes técnicas de medição de resistividade elétrica?			
RES pelo método de Wenner	REV pelo método direto	REV extraída do RCPT	ANOVA indica se há diferença estatisticamente significativa

FONTE: O autor (2023).

Casos nos quais houve distinção estatística entre grupos, observaram-se os limites de precisão indicados na tabela 9. Por fim, obteve-se as curvas de regressão que melhor correlacionaram as técnicas.

3.4.2 Efeito de adições de MCS sobre a resistividade elétrica do concreto

A Tabela 22 apresenta o tratamento estatístico dado às variáveis de resposta, à luz do objetivo de se investigar o efeito de adições de MCS ao concreto, sobre a resistividade elétrica.

TABELA 22 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO PARA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE MCS SOBRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Qual é a correlação entre as diferentes técnicas de medição de resistividade elétrica?					
REV da amostra TR	REV da amostra TSCA	REV da amostra TM	REV da amostra TCV	REV da amostra TF	ANOVA indica se há diferença estatisticamente significativa

FONTE: O autor (2023).

A diferença estatística entre os grupos, permite se concluir que há influência da variação do parâmetro em estudo, sobre a resposta encontrada.

3.4.3 Evolução da resistividade elétrica com o processo de hidratação

A Tabela 23 apresenta o tratamento estatístico dado às variáveis de resposta, à luz do objetivo de se investigar a evolução da resistividade com o processo de hidratação do concreto.

TABELA 23 – TRATAMENTO ESTATÍSTICO: EVOLUÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA COM O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO

Qual é influência do processo de hidratação na evolução da resistividade?					
REV aos 7 dias	REV aos 28 dias	REV aos 56 dias	REV aos 91 dias	REV aos 154 dias	ANOVA indica se há diferença estatisticamente significativa

FONTE: O autor (2023).

O gráfico da evolução da REV em função do tempo foi plotado. A análise estatística foi feita para todos os traços.

3.4.4 Correlação da REV com outros parâmetros de durabilidade

A evolução da REV de cada traço, em consonância com o decorrer do processo de hidratação do concreto, foi comparada a:

- resistência à compressão simples, pela curva de regressão linear entre os fatores;
- resistência à penetração de cloretos, pela curva de regressão linear entre os fatores;
- absorção de água por imersão e índice de vazios, e por capilaridade, aos 154 dias, por comparação;
- faixas de valores de resistividade associadas ao risco de corrosão, propostas pelo CEB 192 (1989), por comparação (ver Tabela 4);
- faixas de valores de carga elétrica, obtidas pelo RCPT, associadas à penetrabilidade de íons cloreto, de acordo com Whiting (1981) e ASTM C1202-19 (ver Tabela 5).

3.5 CONSTRUÇÃO DE UM APARATO DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA

Um protótipo de aparato de medição de REV foi construído e desenvolvido durante o programa experimental. O projeto piloto foi norteado pelas prescrições da norma ASTM C1876-19, com algumas diferenças em relação às recomendações normativas. Os resultados apresentados pelo protótipo foram semelhantes aos de outros métodos de medição de resistividade, o que validou a construção do aparato.

O custo da construção não ultrapassou o equivalente a U\$ 1.000,00 (mil dólares), o que é relativamente baixo em relação aos dispositivos para medição de resistividade elétrica do concreto, disponíveis no mercado internacional.

3.5.1 Equipamentos eletrônicos

O critério de escolha dos equipamentos eletrônicos foi possuir a capacidade de operar na faixa de frequência do ensaio e manter uma tensão elétrica capaz de fazer percorrer uma corrente elétrica através de toda a seção do corpo de prova.

A Figura 38 apresenta um gerador de ondas arbitrárias, que foi escolhido para ser utilizado como fonte de tensão.



FONTE: Adaptado de Icel (2020).

O gerador de ondas arbitrárias³ observado na Figura 38 tem capacidade de gerar ondas senoidais, em frequências selecionadas entre 60 Hz e 1.000 Hz, com amplitude de onda de até 20 Vpp.

A Figura 39 apresenta um dos multímetros⁴ utilizados como medidores de tensão e de corrente elétrica. O critério de escolha do modelo foi possuir capacidade de ler tensão e corrente elétrica nas faixas de frequência do ensaio. Esse equipamento

³ Modelo GV-2015, da fabricante ICEL.

⁴ Modelo 9808⁺, da fabricante Ruoshui.

tornou possível ler valores de corrente elétrica da ordem de unidades de micro Ampéres, bem como, ler valores de tensão da ordem de unidades de Volts, com precisão de até três casas decimais.

FIGURA 39 – MULTIMETRO DIGITAL MEDIDOR DE TENSÃO OU DE CORRENTE ELÉTRICA

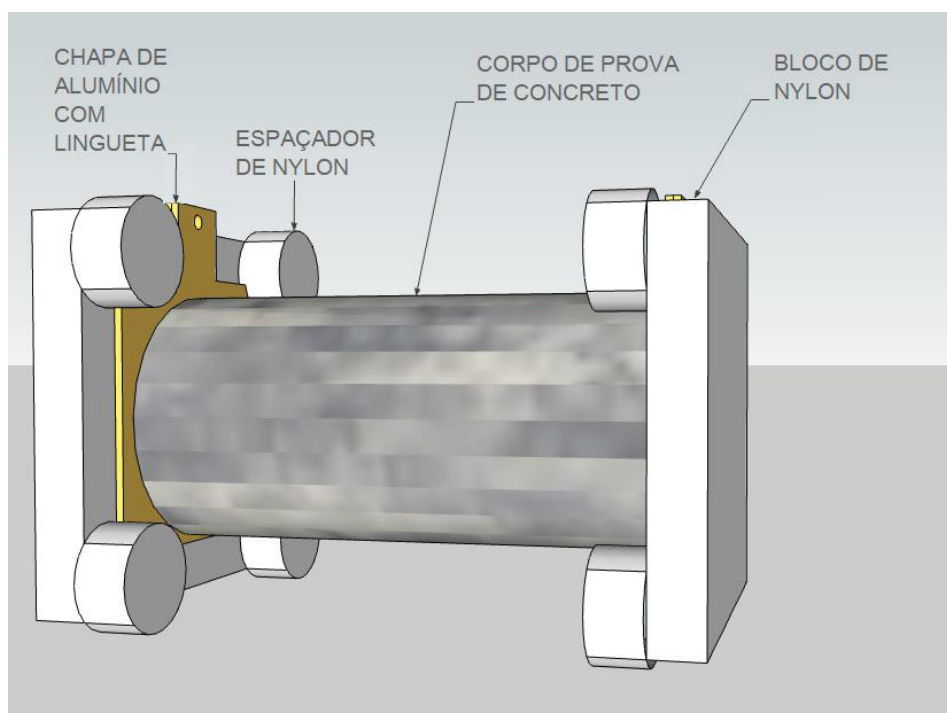


FONTE: Ruoshui (2022).

3.5.2 Eletrodos e dispositivos de suporte

A Figura 40 ilustra o conjunto de eletrodos e de suportes confeccionados em blocos de nylon, acoplados a um corpo de prova.

FIGURA 40 – POSICIONAMENTO DOS ELETRODOS EM CONTATO COM O CORPO DE PROVA COM INDICAÇÃO DOS COMPONENTES DO SUPORTE E ELETRODOS



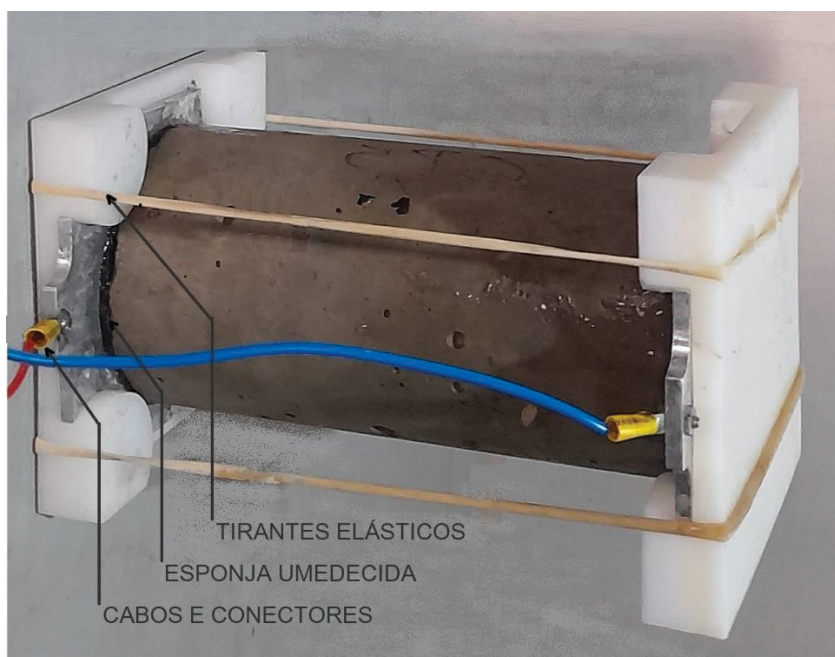
FONTE: O autor (2023).

Suportes de nylon, com placas condutivas são observados na Figura 40. Para melhor visualização dos elementos essenciais, os tirantes elásticos, cabos e conectores e as esponjas umedecidas foram excluídos da ilustração.

A construção dos eletrodos em chapa de alumínio, com seção transversal maior do que a do corpo de prova, permitiu igual distribuição de carga elétrica sobre toda a seção transversal do corpo de prova. Estes eletrodos foram montados em um suporte, não condutivo, capaz de pressioná-los contra a superfície do corpo de prova. Esponjas umedecidas foram inseridas na interface de contato entre as peças metálicas e o corpo de prova.

A Figura 41 mostra um corpo de prova pressionado por tirantes elásticos, contra os eletrodos, durante um teste. Observam-se cabos, conectores e uma das esponjas umedecidas na interface entre o corpo de prova e a uma das placas de alumínio.

FIGURA 41 – CORPO DE PROVA, COM ELETRODOS, MONTADOS NO SUPORTE



FONTE: O autor (2023).

É possível observar na Figura 40 e na Figura 41, que espaçadores posicionam o corpo de prova e eletrodos afastados da superfície da bancada. Tal configuração garantiu o isolamento elétrico do conjunto. A posição horizontal do eixo longitudinal do corpo de prova permitiu que o eventual excesso de solução condutiva presente nas esponjas umedecidas, escorresse diretamente para fora do conjunto. De outra forma,

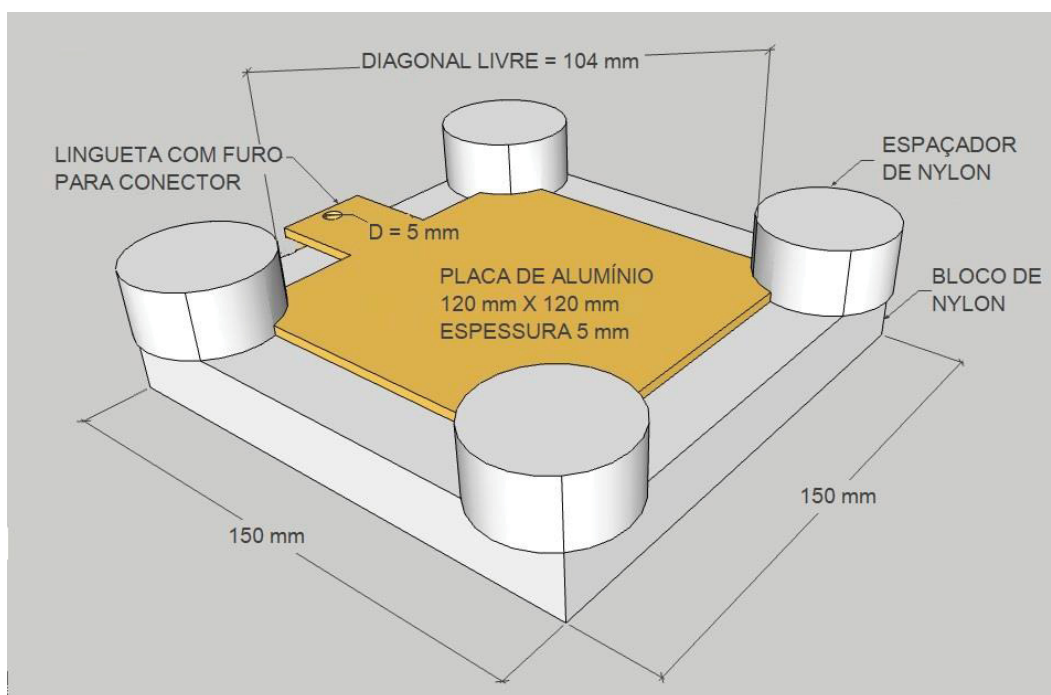
na posição vertical, esse escorrimto poderia formar caminhos mais condutivos pela superfície do corpo de prova, influenciando na medição.

O comprimento dos tirantes relaxados foi determinado de forma experimental, com auxílio de um dinamômetro e uma trena, de tal forma que os tirantes tensionados pelo corpo de prova entre os suportes de nylon, proporcionasse uma carga de aproximadamente 3,5 kg. As esponjas feitas de feltro sintético, com espessura de 2 mm, foram umedecidas com um gel condutivo⁵.

Durante os testes, ao mesmo tempo em que os tirantes elásticos tensionados pressionavam os eletrodos contra a superfície do corpo de prova, foi observado que o incremento da quantidade de gel para umedecimento das esponjas, melhorou a interface de contato, até o limite em que se observou o escorrimto.

A Figura 42 apresenta detalhadamente, o posicionamento da placa de alumínio sobre o suporte de nylon e suas dimensões.

FIGURA 42 – MONTAGEM DO ELETRODO SOBRE O SUPORTE



FONTE: O autor (2023).

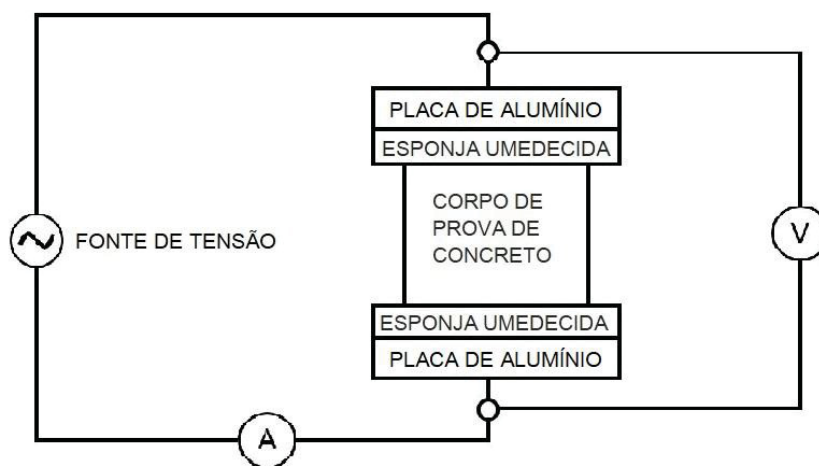
A distribuição espacial dos espaçadores, visualizada na Figura 42, confina a face do corpo de prova acomodado sobre a placa condutiva. A rigidez proporcionada pelo material e espessura do bloco, permite que a carga aplicada pelos tirantes elásticos seja distribuída uniformemente pela face do corpo de prova.

⁵ Gel Clínico, incolor, da fabricante RMC.

3.5.3 Diagrama de circuito elétrico

O circuito elétrico compreende as resistências ligadas a uma fonte de tensão, com medidores de corrente elétrica e de tensão. A Figura 43 ilustra o diagrama de circuito, no qual é possível observar que: a resistência é composta pelo corpo de prova e esponjas umedecidas, ligados em série; um voltímetro V, é ligado aos polos da resistência, mede a tensão; e simultaneamente, um amperímetro A, ligado em série entre um dos polos da resistência e da fonte de tensão, mede a intensidade de corrente.

FIGURA 43 – DIAGRAMA DE CIRCUITO DO MÉTODO DIRETO



FONTE: O autor (2023).

3.5.4 Configuração aparato de medição de REV

A conexão elétrica entre o CP e os componentes eletrônicos apresentou melhoria pelo uso de esponjas umedecidas com gel condutivo. Por sua vez, essas esponjas são resistivas. Dessa forma, assim utilizadas, as esponjas se tornaram parte dos eletrodos.

O gerador de funções, usado como fonte de tensão, foi configurado para gerar sinais de onda senoidal, na frequência de 700 Hz, com amplitude de onda igual a 20 V. Um dos multímetros foi configurado para medir a tensão entre os dois eletrodos e o outro, a intensidade de corrente.

Durante as tomadas de medição, os equipamentos eletrônicos, eletrodos, cabos e conectores foram dispostos como se apresenta na Figura 44.

FIGURA 44 – MÉTODO DIRETO: a) MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS ELETRODOS; b) MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CONJUNTO CORPO DE PROVA MAIS ELETRODOS

a)



b)



FONTE: O autor (2023).

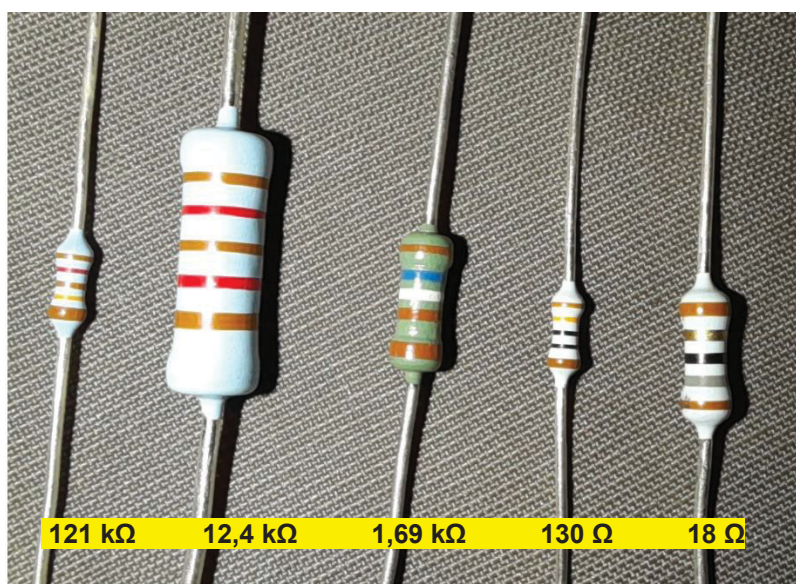
Na Figura 44, observam-se as duas configurações de montagem do aparato. Na Figura 44 (a), determina-se a resistência dos eletrodos, na Figura 44 (b), a resistência do conjunto completo, formado pelo corpo de prova mais os eletrodos.

No circuito elétrico ilustrado na Figura 44 (a), a resistência elétrica oferecida pelos eletrodos foi chamada de “ $R_{\text{eletrodos}}$ ”. Nessa configuração os eletrodos compreenderam apenas as placas de alumínio, esponjas umedecidas, cabos e conectores. Na Figura 44 (b), o corpo de prova, juntamente com os eletrodos compuseram uma resistência chamada “ $R_{\text{média}}$ ”. Subtraiu-se o valor “ $R_{\text{eletrodos}}$ ”, de “ $R_{\text{média}}$ ”, encontrou-se a resistência do corpo de prova. Isso permitiu o cálculo da REV do corpo de prova.

3.5.5 Calibração das leituras

A calibração das leituras foi feita com um sistema elétrico razoavelmente simples, adaptado das recomendações da norma ASTM C1876-19. Com o amperímetro e o voltímetro constituintes do aparato, tomaram-se medições de resistência elétrica de resistores de resistência conhecida. Foram usados resistores com variação máxima de 1% entre a resistência nominal e aparente, mostrados na Figura 45.

FIGURA 45 - RESISTORES DE PRECISÃO USADOS NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DAS LEITURAS



FONTE: O autor (2023).

Como se observa na Figura 45, foram utilizadas cinco faixas de valores de resistência, a partir da ordem de dezenas de ohms (18Ω) a mais de uma centena de milhares de ohms ($121 \text{ k}\Omega$). As medições ficaram dentro do limite esperado, o que validou a calibração do aparato, como também sua construção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

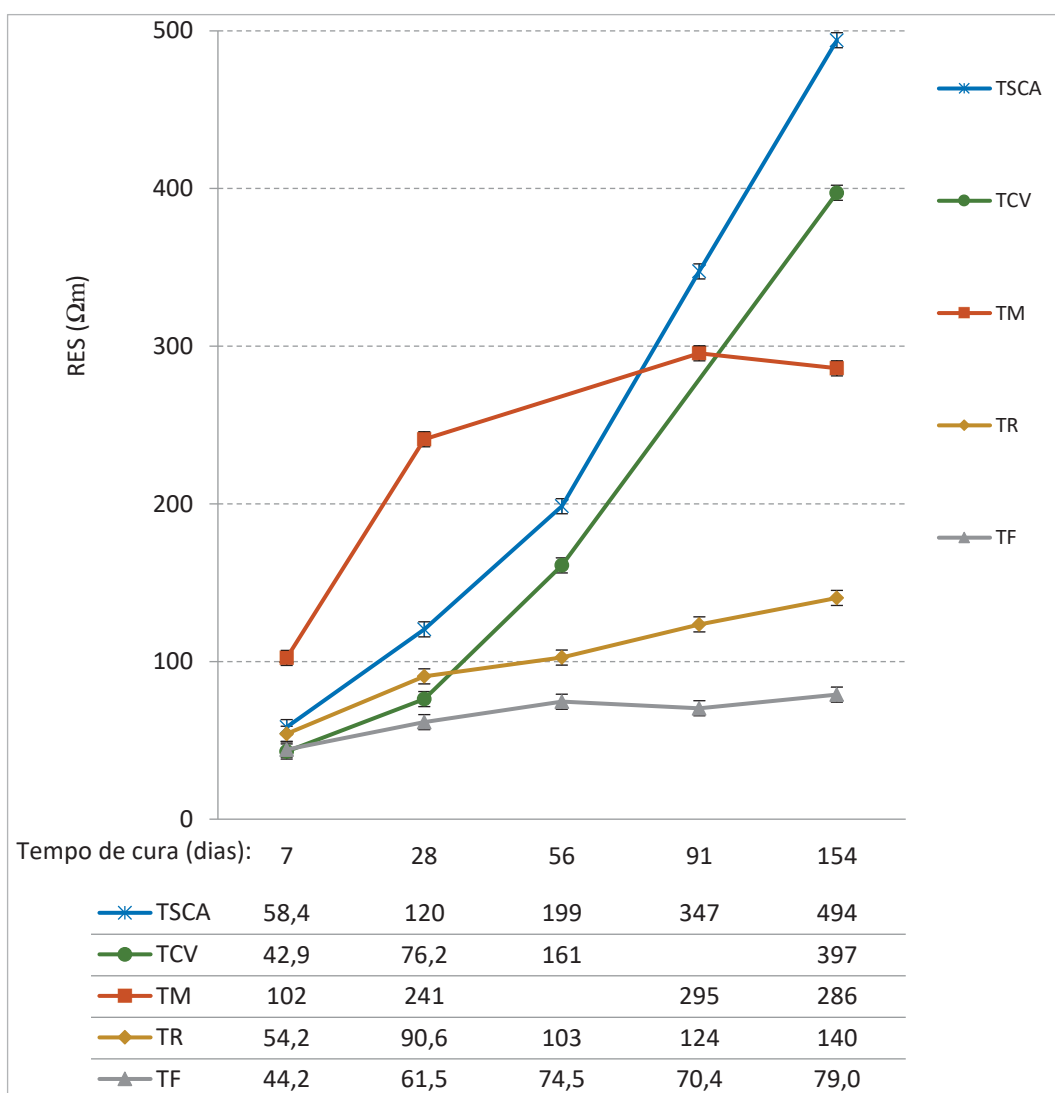
4.1 MEDIÇÕES DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

4.1.1 Resistividade elétrica superficial (RES)

No Apêndice 3, são apresentados os registros do teste de RES e o tratamento estatístico dos dados. No Quadro 35, podem ser observadas as leituras de RES, juntamente com os valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação, por corpo de prova. O tratamento estatístico desses dados, com eliminação de elementos espúrios, é apresentado no Quadro 36. No Quadro 37, esse tratamento estatístico é repetido por traço. Após a eliminação de dados espúrios, no Quadro 38 se pode observar a aplicação da constante de correção de célula, de acordo com a Tabela 7 e transformação de unidades. Depois disso, esses dados foram submetidos a uma análise de variância ANOVA e teste de Tukey com 95% de confiabilidade. A análise ANOVA foi feita com os seguintes fatores controláveis: tempo de hidratação do cimento e composição de aglomerantes do traço (ver Quadro 40). Nesse ponto identificou-se um pico de RES, aos 56 dias, da amostra TM, que foi descartado como elemento espúrio (ver Figura 77 e Tabela 46). Foi necessário repetir a análise com os novos dados (ver Quadro 43, Tabela 47 e Tabela 48).

A Figura 46 apresenta os valores amostrais médios de RES obtidos pelo método de Wenner, conforme Tabela 49. Cada ponto inscrito no gráfico representa uma média das médias de até seis corpos de prova, quando não houve eliminação de eventuais elementos espúrios; as barras de erro representam três vezes o desvio padrão das médias, para mais e para menos. Foi aplicada a respectiva constante de correção de célula, ou fator de forma, apresentado na Tabela 7, de acordo com AENOR UNE 83988-2, bem como Morris, Moreno e Sagüés (1996) (ver Quadro 38). Considerando o limte de decisão do teste de Tukey, igual a 9,55 (ver Quadro 44), podem-se fazer observações relativas a: (1) tendência crescimento da RES com o decorrer do processo de hidratação do cimento; (2) intensidade das mudanças, observada em função da inclinação da curva; (3) magnitude dos valores. Portanto, sobre o crescimento da RES é possível observar que todas as amostras apresentaram crescimento ao longo do tempo.

FIGURA 46 – RES MÉDIA, POR TRAÇO AO LONGO DO TEMPO



FONTE: O autor (2023).

Sobre a intensidade de crescimento ao longo do tempo, as curvas de TF e TM demonstram tendência de estabilização depois dos 56 dias; a curva de TR demonstrou menor crescimento depois dos 28 dias; as curvas de TSCA e TCV se apresentam mais inclinadas do que as demais, indicando crescimento maior. A partir dos 28 dias todas as amostras apresentaram médias estatisticamente distintas. TF apresentou RES inferior ao traço de referência durante todo o tempo de observação, mostrando tendência de estabilização depois dos 56 dias.

O fíler calcário, presente no traço TF, apresentou impacto negativo, reduzindo a RES em relação ao traço de referência. Sua resistividade demonstrou menor crescimento dos sete dias aos 56 dias, em relação aos demais traços, cessando depois disso. Oliveira (2016) também observou impacto negativo e tendências similares observadas em traços com substituição de cimento por fíler calcário. Esse

comportamento pode ser explicado pela pouca, ou ausente reatividade pozolânica do material (GOBBI, 2014), que contribui apenas para a densificação da pasta através da finura de suas partículas, sem contribuir com a formação de C-S-H, como os MCS empregados neste trabalho.

Araújo, Macioski e Medeiros (2022) exploraram traços com cinza volante e com cinza de casca de arroz, comparando-os com um traço de referência, com CP V-ARI, sem MCS – muito parecidos com TR, TCV e TSCA do presente trabalho. Esses pesquisadores também encontraram tendências similares às encontradas nesse trabalho. Da mesma forma, a pesquisa de Real (2015) alcançou resultados de resistividade elétrica compatíveis com os do presente trabalho, no que se refere a traços similares a TR e TM. O traço que apresentou maior RES, de Araújo, Macioski e Medeiros (2022) foi o similar ao TSCA, seguido pelo similar ao TCV.

Real (2015) observou aos 91 dias, que o traço com substituição de 10% de cimento por metacaulim, apresentou RES 71% maior do que o traço de referência. Neste trabalho, TM ao 91 dias, apresentou RES 138% maior do que o traço de referência. Isso corresponde aproximadamente ao dobro do encontrado por Real (2015). Uma vez que a resistividade elétrica do concreto é influenciada pela composição de aglomerantes, devido a seus impactos no refinamento dos poros da matriz (HOPPE, 2005), bem como, na composição iônica da solução aquosa presente nos poros (TIBBETTS, 2020), essa diferença pode ser explicada pelas diferentes origens dos MCS, que por essa razão possuem valores de reatividade e composições químicas diferentes.

Deve-se destacar que a análise relativa ao risco de corrosão correlacionado a faixas de valores de RES é feita em capítulo dedicado à resistividade elétrica do concreto.

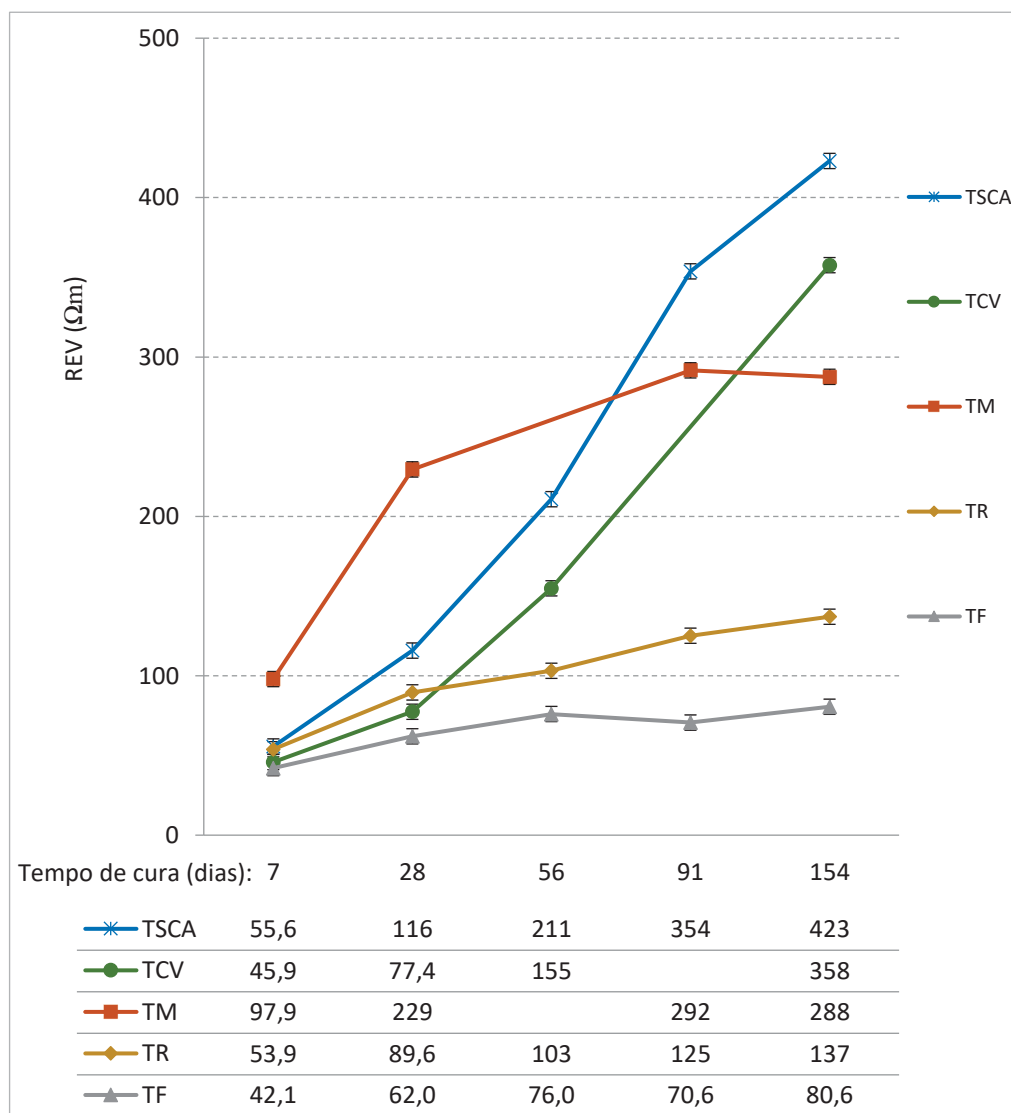
4.1.2 Resistividade volumétrica (REV)

Os registros dos testes de REV são apresentados no Apêndice 4. As leituras de voltagem e intensidade de corrente, e determinação da REV, estão demonstradas no Quadro 45. O tratamento estatístico desses dados, que resultou na eliminação de elementos espúrios, encontram-se no Quadro 46. Uma análise de variância ANOVA tomando a composição de aglomerantes e o tempo de hidratação do cimento como variáveis independentes, identificou um pico de resistividade, confirmado pelo teste

de Tukey, da amostra TM aos 56 dias (ver Figura 78 e Tabela 50). Portanto, os resultados de TM56 foram eliminados como elementos espúrios. Uma segunda análise ANOVA, apresentada no Quadro 51 foi realizada. Essa análise indicou distinção estatística entre grupos, com 95% de confiabilidade.

A Figura 47 apresenta a REV média por amostra, obtida pelo método direto, de acordo com a Tabela 53. Cada resultado demarcado no gráfico constitui uma média das médias de até seis corpos de prova, nos casos em que não foram eliminados elementos espúrios; as barras de erro representam três vezes o desvio padrão das médias, para mais e para menos.

FIGURA 47 – REV MÉDIA, POR TRAÇO AO LONGO DO TEMPO



FONTE: O autor (2023).

Na Figura 47, observam-se semelhanças com as curvas apresentadas na Figura 46, nas tendências de crescimento e de magnitude dos resultados de cada

amostra. A fim de explicar tais semelhanças, considere-se o cuidado tomado para que os corpos de prova, no decorrer do tempo, mantivessem características semelhantes entre o material presente nas camadas mais próximas da superfície e o material das camadas mais profundas do corpo de prova. Foi tomado o cuidado para que os corpos de prova estivessem saturados, não houvessem passado por perturbações, tampouco contaminações superficiais que pudessem ter influência sobre a resistividade elétrica, até o momento do ensaio. Em segundo lugar, as amostras utilizadas nos dois métodos, eram compostas pelos mesmos corpos de prova.

Considerando-se que, o método de Wenner avalia a resistividade da camada superficial (MINAGAWA, 2023; MORRIS, 1996; POLDER, 2000, 2001; ROBLES, 2020), enquanto o método direto avalia o material do tronco do corpo de prova (GHOSH E TRAN, 2015; POLDER, 2000, 2001; SPRAGG, 2011) – se a amostra encontra-se nas condições anteriormente descritas, aplicando-se a constante de correção de célula, conforme Tabela 7, os resultados dos dois métodos têm correlação linear e direta. Tal fato está de acordo com as conclusões de Morris, Moreno e Sagüés (1996), Ghosh e Tran (2015), e com a proposição da norma AENOR UNE 83988-2:2014.

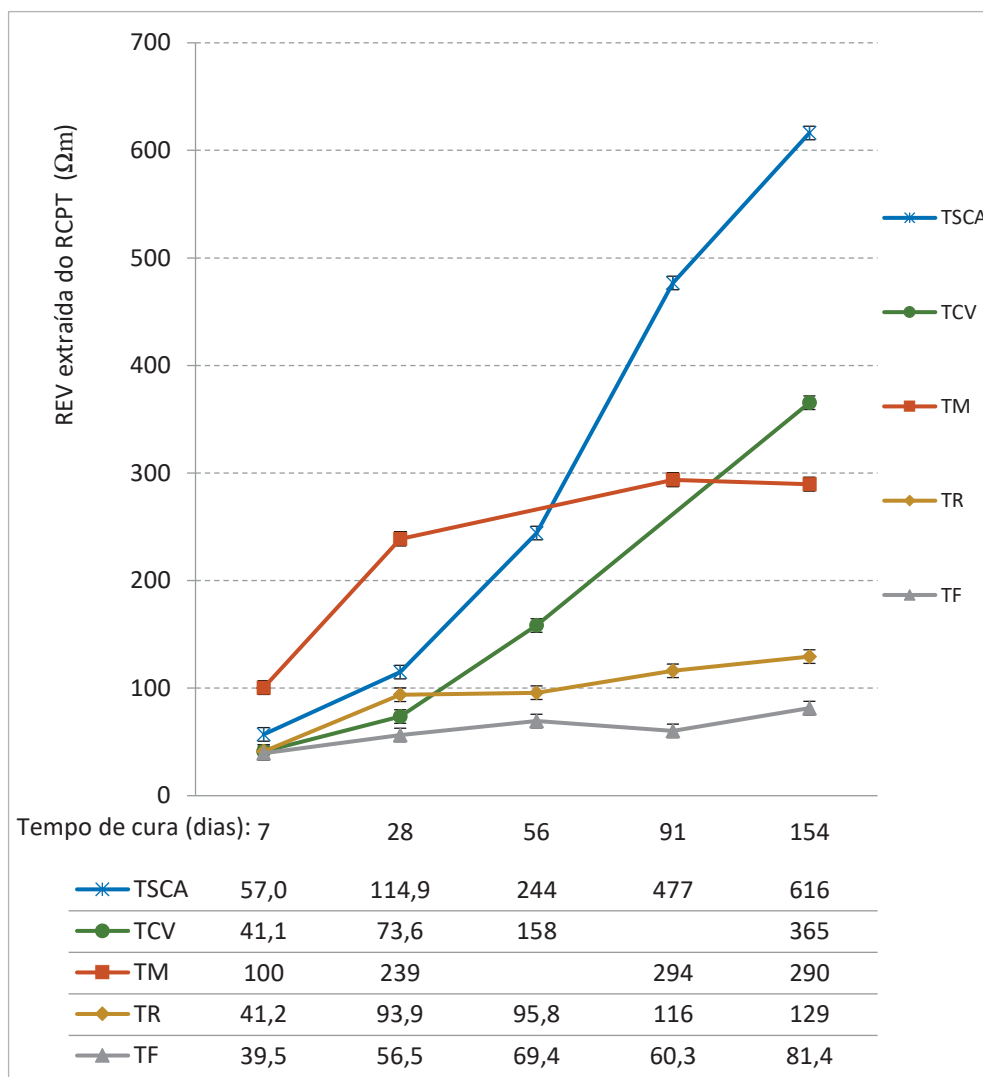
A semelhança entre os resultados obtidos pelos métodos direto e de Wenner é discutida com mais profundidade em uma seção específica neste trabalho.

4.1.3 Resistividade volumétrica extraída do RCPT

A REV extraída do RCPT é apresentada no Quadro 61, no Apêndice 5. Uma análise de variância ANOVA identificou e confirmou um pico da amostra TM, na abcissa 56 (ver Figura 80 e Tabela 58). O resultado de TM56 foi descartado como elemento espúrio, depois uma nova análise ANOVA foi feita (ver Quadro 65 e Quadro 66).

A Figura 48 apresenta os resultados das médias amostrais da REV extraída do RCPT, de acordo com a Tabela 61. Cada ponto de dado foi calculado pela média das médias de até quatro corpos de prova, ou menos, devido à eventual eliminação de elementos espúrios. Os limites de Tukey, de três vezes o desvio padrão das médias, para mais e para menos, estão representados pelas barras de erro.

FIGURA 48 – REV MÉDIA EXTRAÍDA DO RCPT, POR TRAÇO AO LONGO DO TEMPO



FONTE: O autor (2023).

Observa-se na Figura 48, com alguma discrepância na magnitude de valores, as tendências de crescimento e de intensidade de mudanças observadas nas curvas de resultados dos métodos de Wenner e direto. Com o limite de decisão do teste de Tukey igual a 12,6 (ver Quadro 67), todos os traços apresentaram resultados estatisticamente distintos a partir dos 28 dias. Em geral, a REV extraída do RCPT cresceu ao longo do tempo. O traço com uso de sílica de casca de arroz, TSCA apresentou a maior média depois dos 91 dias, seguida por TCV, TM, TR e TF. O uso de fíler calcário em substituição ao cimento, no traço TF, teve impacto negativo sobre a resistividade elétrica, com TF apresentando os menores valores a partir dos 28 dias. Valores de REV obtidos de TR e TF mostram tendências de menor crescimento, intercaladas por estabilidade de valores a partir dos 28 dias. A curva de TM mostra essa tendência depois dos 91 dias.

As discrepâncias do comportamento demonstrado pela REV extraída pelo RCPT em relação à RES pelo método de Wenner e REV pelo método direto devem-se à maior variabilidade inerente ao teste RCPT. De acordo com a norma ASTM C1202-19, aceitam-se coeficientes de variação de até 12,3%, e precisão de 34%, contra 4,3% e 12% no método direto, de acordo com a norma ASTM C1876-19 (ver Tabela 9).

As semelhanças entre os métodos de Wenner, direto e da REV extraída pelo RCPT são discutidas com mais profundidade em uma seção dedicada a correlacionar esses métodos. Da mesma forma, a comparação e discussão dos resultados obtidos à luz de dados disponíveis na literatura científica é feita em outra seção.

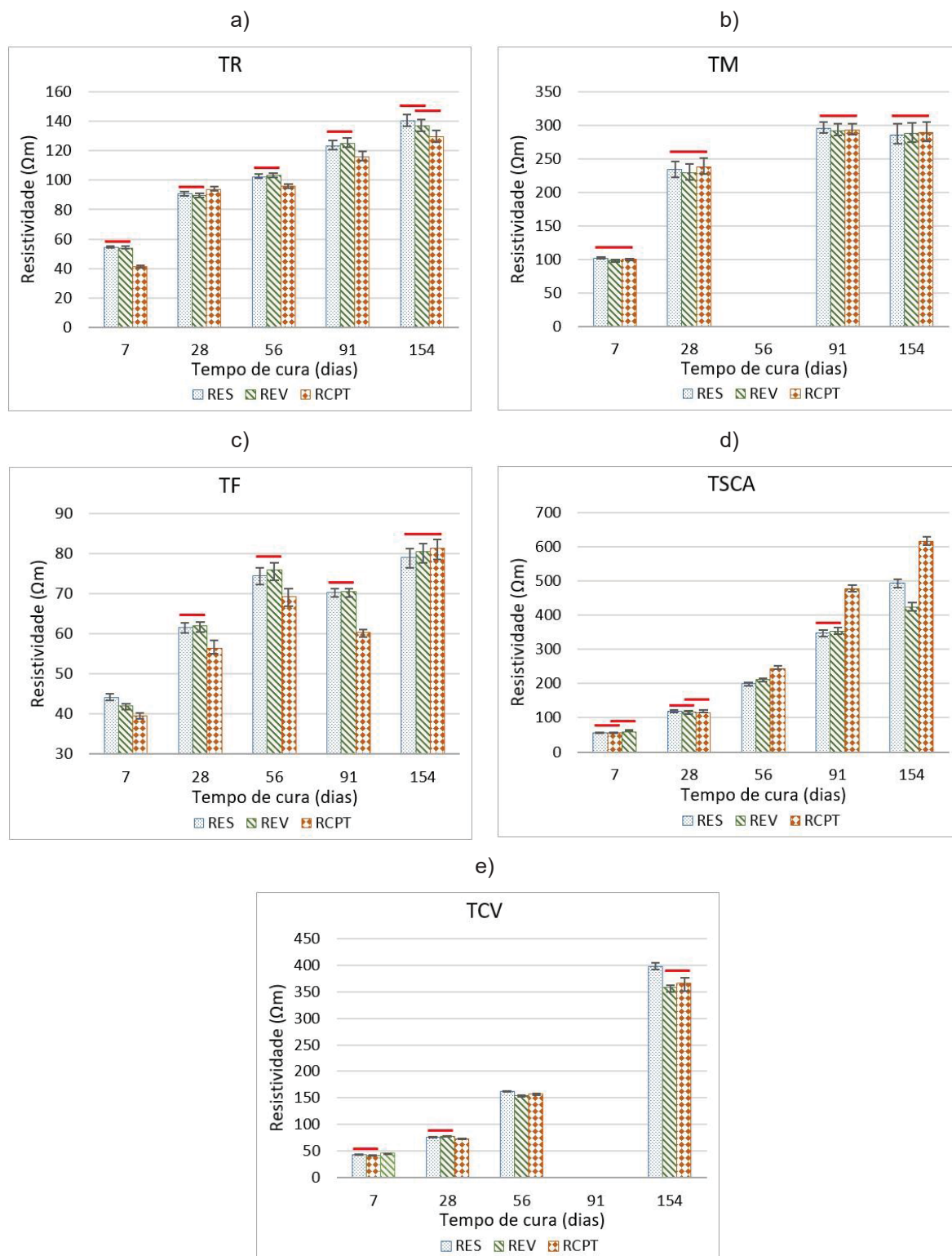
4.2 CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO CONCRETO

4.2.1 Distinção estatística entre resultados de métodos de medição de resistividade elétrica

No Apêndice 6 estão apresentadas as análises de variância ANOVA, por traço e os testes de Tukey que auxiliaram na avaliação do efeito da variação do método de medição sobre a resistividade, com 95% de confiabilidade (ver Quadro 68, Quadro 69, Quadro 70, Quadro 71, Quadro 72, Quadro 73, Quadro 74, Quadro 75, Quadro 76, Quadro 77, Quadro 78, Quadro 79, Quadro 80, Quadro 81 e Quadro 82).

A Figura 49 apresenta as semelhanças estatísticas entre resultados obtidos pelos três métodos: o de Wenner (RES), o direto (REV) e da REV extraída do RCPT. Os casos foram agrupados por traço e por tempo de hidratação do cimento. Nesta demonstração foram considerados os limites de decisão dos respectivos testes de Tukey representados pelas barras de erro. Os dados estatisticamente semelhantes estão assinalados pelas barras vermelhas horizontais. A Figura 49 (a) mostra que há semelhança estatística entre os resultados de RES e REV, no traço TR, em todas as idades. Os valores extraídos do RCPT têm semelhança com os de REV apenas aos 154. Na Figura 49 (b), de acordo com o teste de Tukey, não há qualquer distinção estatística entre os grupos do traço TM. Na Figura 49 (c), traço TF, há semelhança entre resultados aos 154 dias. Dos 28 dias aos 91 dias, a REV extraída do RCPT é estatisticamente distinta dos demais resultados em todos os grupos. Aos sete dias, não se observa qualquer semelhança entre grupos.

FIGURA 49 – DISTINÇÃO ESTATÍSTICA ENTRE MÉTODOS POR TRAÇO: a) TR; b) TM; c) TF; d) TSCA; e) TCV



FONTE: O autor (2023).

Na Figura 49 (d), os testes realizados com o traço TSCA algumas semelhanças entre dados, aos sete e 28 dias. Aos 91 dias, a resistividade extraída do RCPT é maior do que as demais. Aos 56 dias e 154 dias, os resultados dos três ensaios são estatisticamente distintos. Na Figura 49 (e), os resultados obtidos do traço TCV têm semelhança entre RES e RCPT aos sete dias. Aos 28 dias há semelhança entre os resultados de RES e REV, e aos 154 dias, entre REV e RCPT. Aos 56 dias, não há semelhança estatística entre os resultados dos três ensaios.

Tomando-se os dados do método direto como valores de referência, observa-se maior quantidade de casos de distinção estatística em relação ao método da resistividade extraída do RCPT, num total de 13 (57%), contra apenas seis (26%) no método de Wenner (RES). Isso se deu, provavelmente porque a variabilidade inerente ao RCPT é mais alta em relação ao método de Wenner.

Para que sejam analisados os casos de maior discrepância, os respectivos coeficientes de variação observados foram relacionados na Tabela 24.

TABELA 24 – COEFICIENTES DE VARIAÇÃO OBSERVADOS DENTRO DOS ENSAIOS, PARA AS AMOSTRAS TSCA91, TSCA154 E TF7

Método	Coeficiente de variação			Referências
	TSCA91	TSCA154	TF7	
RCPT	4,2%	6,2%	7,6%	Ver Quadro 53
Wenner (RES)	4,3%	4,9%	0,6%	Ver Quadro 37
Direto (REV)	3,9%	3,5%	3,4%	Ver Quadro 46

FONTE: O autor (2023).

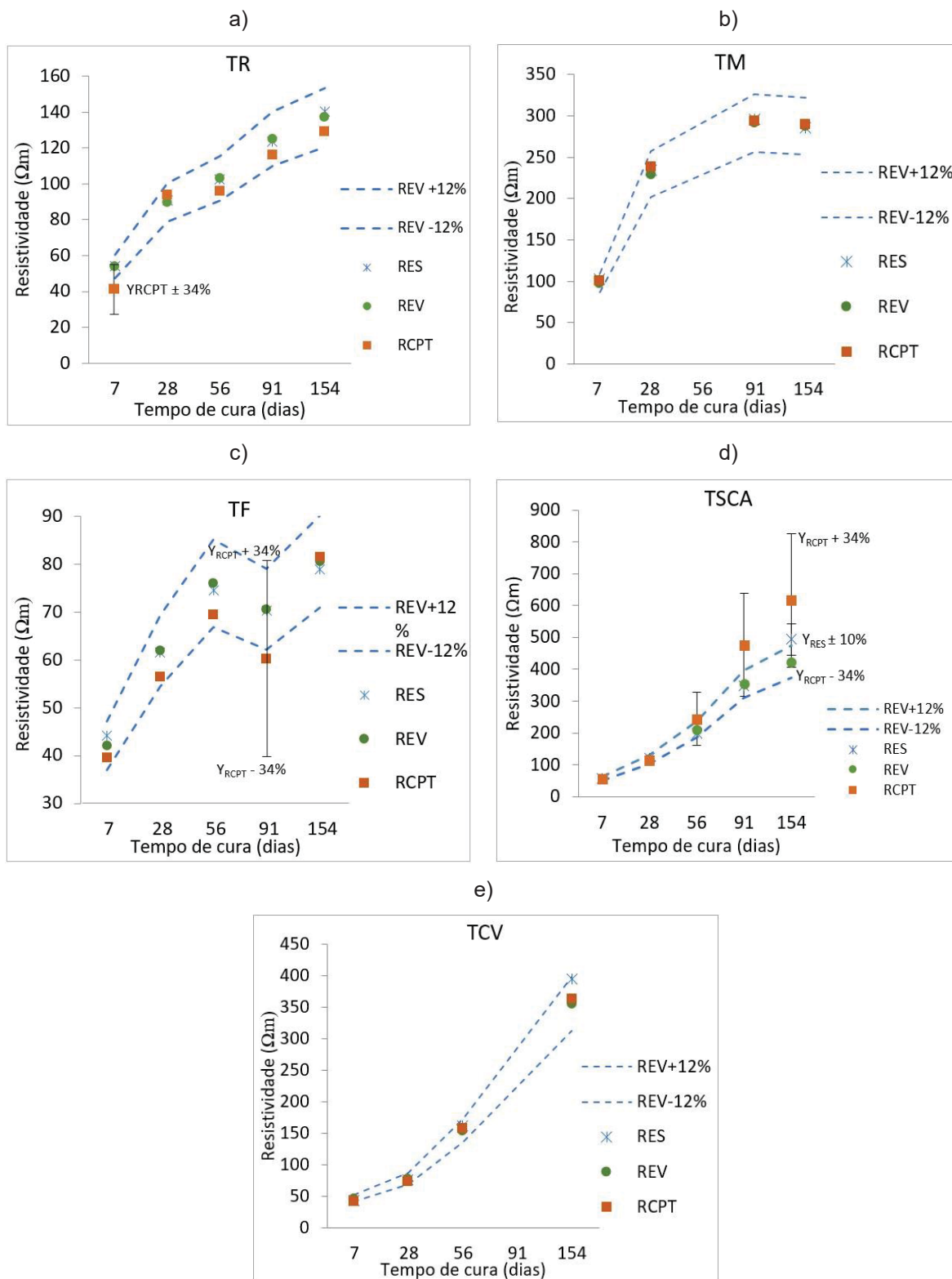
De acordo com a ASTM C1202-19, no RCPT são aceitáveis coeficientes de variação unilaboratoriais de até 12,3%, com desvios máximos de até 34%. De acordo com a AENOR 83988-2:2014, no método de Wenner espera-se uma repetibilidade de 10%, com precisão de até 26%. Dito isso, as eventuais não coincidências observadas enquadram-se na variabilidade inerente à resistividade elétrica do concreto. Tal fato indica que a variabilidade inerente aos métodos foi responsável pela distinção estatística observada. Mesmo assim, para aprofundamento do estudo, todos os casos estatisticamente distintos, foram reavaliados à luz de faixas limite de variabilidade.

4.2.2 Semelhança entre métodos por faixas limite de variabilidade de resultados

A Figura 50 evidencia os resultados diante da faixa de variabilidade do método de direto (REV), tomado como método de referência. Os limites de variabilidade

aplicados nesta análise estão de acordo com as normas ASTM C1202-19 e ASTM C1876-19, e com o trabalho de Spragg et al. (2011), observados na Tabela 9.

FIGURA 50 – SEMELHANÇA ENTRE MÉTODOS POR FAIXA DE VARIABILIDADE, POR TRAÇO: a) TR; b) TM; c) TF; d) TSCA; e) TCV



FONTE: O autor (2023).

A faixa de variabilidade esperada do método direto, de mais ou menos 12% é destacada em todas as análises gráficas da Figura 50. Fica evidente que, na maioria dos casos, os resultados dos três métodos testados estão contidos nessa faixa. Isso é válido mesmo nos casos em que a semelhança estatística não foi apontada pelo teste de Tukey, na Figura 49.

Na Figura 50(a), observa-se um ponto fora da faixa, que se refere à média de resistividade extraída do RCPT, do traço TR, aos sete dias. Porém, a variabilidade esperada de 34%, inerente ao teste RCPT, demonstrada pela barra de erro, indica que há equivalência entre os resultados. Da mesma forma explicam-se os resultados de TF aos 91 dias, na Figura 50(c), TSCA aos 56 dias, 91 dias e 154 dias, na Figura 50(d).

O único resultado do método de Wenner (RES) não contido na faixa de variabilidade de referência, é observado na Figura 50(d), aos 154 dias. Entretanto, a variabilidade esperada do método de Wenner, representado pela barra de erro, é de $\pm 10\%$. Essa barra de erro mostra que o resultado poderia estar contido dentro da faixa de variabilidade do método direto, o que evidencia correlação.

A partir das observações da Figura 49 e Figura 50, pode-se concluir que os três métodos de medição de resistividade elétrica têm semelhança, com suas correlações limitadas pela variabilidade inerente aos próprios métodos.

4.2.3 Correlação determinada por regressão linear simples

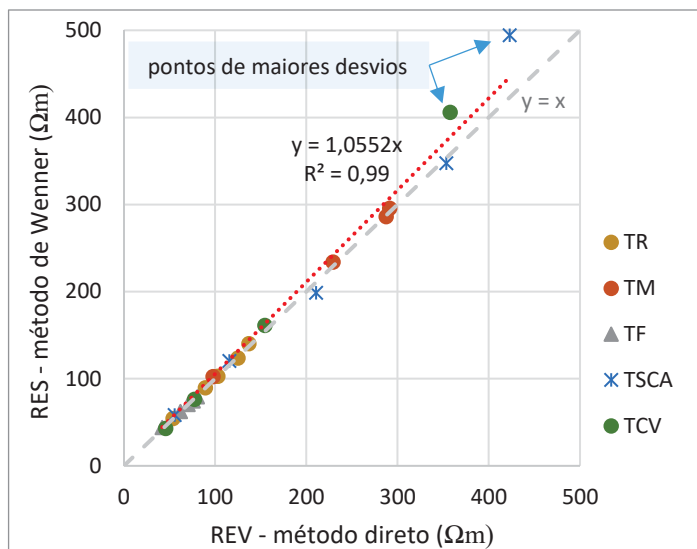
Nas análises apresentadas nesta seção, observam-se coeficientes de determinação, R^2 , acima de 0,94. Esse valor está de acordo, ou acima dos valores encontrados por alguns outros pesquisadores. Uma das razões que podem ter contribuído com essa observação é a redução da variabilidade proporcionada pela utilização de *médias das médias* de corpos de prova utilizados como unidades de análises.

4.2.3.1 Correlação entre o método de Wenner e o método direto

A Figura 51 apresenta a correlação encontrada entre o método de Wenner e o método direto. Cada dado plotado corresponde à média das médias de até seis corpos de prova da mesma amostra, nos casos em que não houve eliminação de dados espúrios. Os valores médios de RES foram obtidos pelo método de Wenner,

devidamente corrigidos pela constante de correção de célula, ou fator de forma , conforme a Tabela 7, de acordo com norma AENOR UNE 83988-2:2014.

FIGURA 51 - CORRELAÇÃO: MÉTODO DE WENNER X MÉTODO DIRETO



FONTE: O autor (2023).

Na Figura 51 foram demarcadas as linhas “ $y = x$ ” a título de referência de equivalência perfeita entre os métodos de medição. Pode-se observar as linhas de tendência de correlação linear entre os métodos, as equações e os coeficientes de determinação para cada caso.

Morris, Moreno e Sagüés (1996) encontraram um desvio médio máximo de 6%, em relação à REV tomada pelo método direto, após aplicação da constante correção de célula às leituras de RES. Neste trabalho foi aplicada a constante de correção de célula às leituras do método de Wenner, assim como no trabalho de Morris, Moreno e Sagüés (1996). Os maiores valores de desvio médio máximo encontrados foram de 7,8% e 6,3%, que correspondem a apenas dois pontos destacados na Figura 50. Os demais 20 pontos apresentam desvios entre 0,04% a 3,29%.

Obteve-se R^2 igual a 0,99 assim como se apresenta no trabalho de Spragg (2011) (ver Figura 27). Ghosh e Tran (2015) também encontraram correlação linear entre os resultados do método de Wenner e o método direto, com R^2 variando entre 0,92 a 0,82 (ver Figura 26).

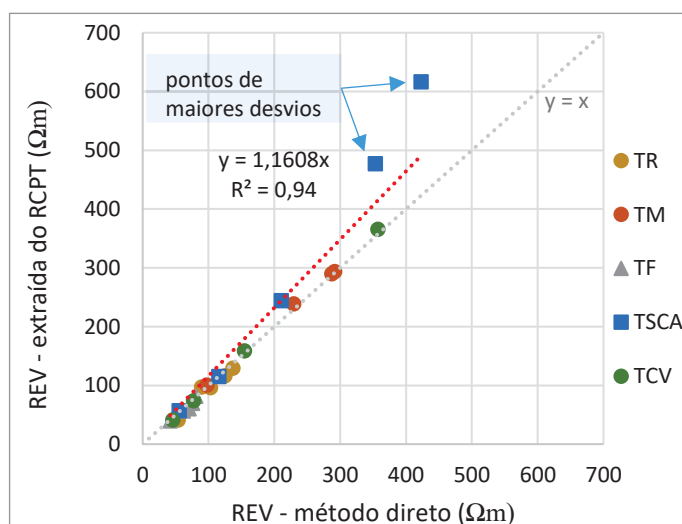
A correlação obtida está de acordo com Ghosh e Tran (2015), bem como, Spragg (2011), que por sua vez, está de acordo com os valores propostos por Morris, Moreno e Sagüés (1996) e com AENOR 83988-2:2014. Isso confirma que: a constante

de correção de célula, ou fator de forma, é a correlação entre os resultados do método de Wenner e do método direto; “A medição de RES é um meio indireto de se obter a resistividade volumétrica [...]” (GHOSH E TRAN, 2015, tradução nossa) através da aplicação da constante de correção de célula.

4.2.3.2 Correlação entre o método da REV extraída do RCPT e o método direto

A Figura 52 apresenta as correlações entre os métodos da REV extraída do RCPT e o método direto. Cada ponto da REV extraída do RCPT, corresponde à média de até quatro corpos de prova da mesma amostra. De forma similar, cada ponto da REV obtida pelo método direto, corresponde à média de até seis corpos de prova da mesma amostra.

FIGURA 52 - CORRELAÇÃO: MÉTODO DA REV EXTRAÍDA DO RCPT X MÉTODO DIRETO



FONTE: O autor (2023)

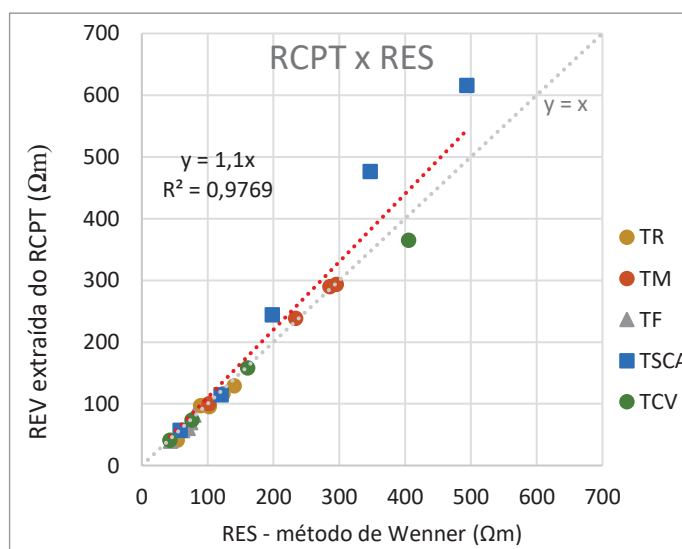
Na Figura 52 observa-se o coeficiente de determinação, R^2 igual a 0,94, indicando que, estatisticamente, 94% da variação de “y” é explicada pela equação de correlação. Essa correlação é menor do que a encontrada entre o método de Wenner e o método direto devido a maior dispersão dos resultados do teste RCPT em relação ao teste de Wenner. O coeficiente de variação esperado no método direto é de 4,3% e precisão de 12%, enquanto no RCPT espera-se respectivamente, 12,3% e 34% (ver Tabela 9). Dentre 23 pontos, observam-se dois de maiores desvios, indicados na Figura 52. Estes pontos estão mais afastados da origem, portanto representam maior resistividade e pertencem ao mesmo traço. Os demais dados estão mais próximos da linha de equivalência perfeita.

Konečný *et al.* (2017) observaram equivalência entre métodos direto e da REV extraída do RCPT, testando um tipo de concreto, com poucos corpos de prova. Torres-Acosta *et al.* (2019) correlacionaram teoricamente a REV à carga passante do RCPT, através da equação (5). A correlação foi testada experimentalmente, encontrando correlações com R^2 superior a 0,8.

4.2.3.3 Correlação entre o método da REV extraída do RCPT e o método de Wenner

A Figura 53 apresenta a correlação encontrada entre os resultados médios das amostras submetidas aos testes de resistividade pelos métodos de Wenner e da resistividade extraída do RCPT. Cada ponto do gráfico representa uma média dos valores médios dos corpos de prova de uma mesma amostra. Os resultados do método de Wenner foram devidamente corrigidos pela constante de correção de célula, conforme Tabela 7.

FIGURA 53 – CORRELAÇÃO: REV EXTRAÍDA DO RCPT X MÉTODO DE WENNER



FONTE: O autor (2023)

Na Figura 53 pode-se observar a linha de tendência e respectiva equação de correlação ($y = 1,1x$); o coeficiente de determinação, R^2 igual a 0,95; a linha de referência $y = x$; e os dados. Assim como na Figura 52, identificam-se neste caso alguns pontos de maior desvio. Wosniack *et al.* (2021), ao realizarem uma análise similar, constataram que certos pontos estatisticamente distintos, com maior dispersão eram os de maior valor de resistividade (ver Figura 14).

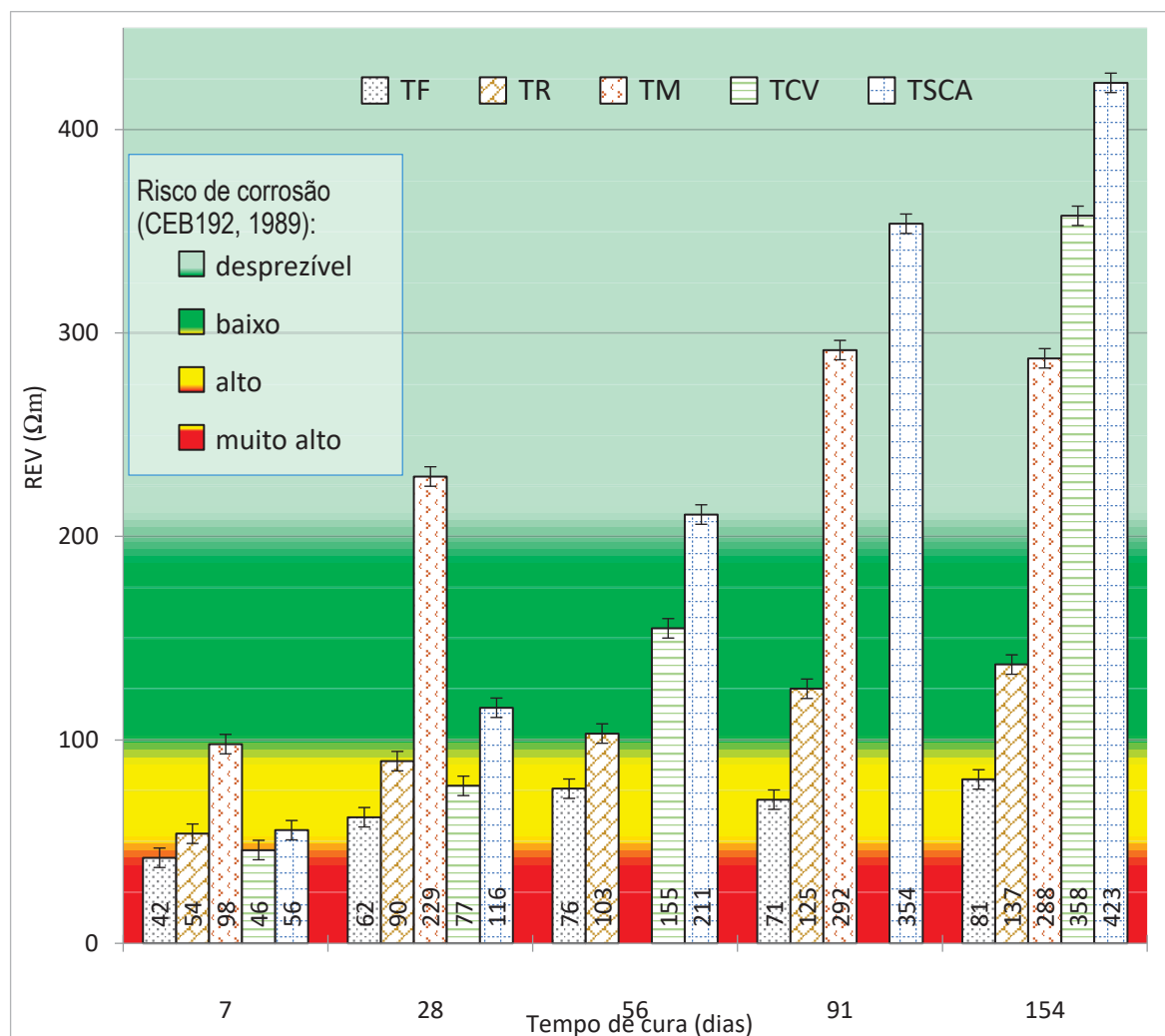
Wosniack *et al.* (2021) correlacionaram a resistividade extraída do RCPT com a RES obtida pelo método de Wenner, obtendo R^2 igual a 0,93. Os autores observaram que a resistividade extraída do RCPT foi 5,31% maior do que a medida pelo método de Wenner, que é coerente com o valor de 10% observado na Figura 53 ($y = 1,1 x$). Essa diferença para mais, pode ser explicada pelo maior intervalo amostral deste trabalho, paralelamente à precisão esperada do RCPT, que é de até 34% (ver Tabela 9). No trabalho de Wosniack *et al.* (2021), cinco tipos de concreto, com traços e MCS, similares ao usado neste trabalho, foram testados aos 28 dias de hidratação do cimento. No presente trabalho, cinco traços foram testados aos sete dias, 28 dias, 56 dias, 91 dias e aos 154 dias. Provavelmente houve maior variabilidade de resultados devido ao maior intervalo amostral, fato que foi refletido na correlação entre os métodos.

4.3 EFEITO DA COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES SOBRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

Uma análise de variância ANOVA em duas vias e teste de Tukey, com 95% de significância, apresentados no Quadro 51, Quadro 52, Tabela 51 e Tabela 52, no Apêndice 4, auxiliaram na identificação do impacto do uso de MCS, juntamente com a evolução do progresso de hidratação do cimento sobre a REV.

A Figura 54 tem objetivo de ilustrar o comportamento dos resultados médios de REV, no decorrer do progresso de hidratação do cimento, durante o tempo de observação. Ao mesmo tempo, seu pano de fundo corresponde às faixas de risco de corrosão em função da resistividade elétrica, propostas pelo CEB 192 (1989), observadas na Tabela 4. A respeito da influência do uso de MCS sobre a resistividade elétrica, de acordo com o teste de Tukey e com a Figura 54, pode-se dizer que, a média de REV do traço TM é a única estatisticamente distinta dos demais, aos sete dias. A partir dos 28 dias, não há semelhança estatística entre valores de REV média de amostras da mesma idade.

FIGURA 54 – REV EM RELAÇÃO À COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES E RISCO DE CORROSÃO



FONTE: O autor (2023).

Até os 28 dias, a REV do traço TM supera em 150% o resultado do traço de referência. Isso implica em dizer que, o uso de metacaulim surtiu o maior impacto sobre a REV, até os 28 dias, em relação ao uso dos demais MCS. O uso de sílica de casca de arroz em TSCA, cinza volante em TCV e metacaulim em TM surtiu os maiores impactos sobre a REV em relação ao traço de referência, ao final do período de observação. Amostras TSCA, TCV e TM apresentaram valores com diferenças de 200 %, 160 % e 110 % a mais do que TR. Por outro lado, o traço TF, usando filer calcário, resultou em resistividade elétrica 40 % inferior à do traço TR. Tais observações permitem afirmar que a composição de aglomerantes, pelo uso dos MCS, e a evolução do progresso de hidratação do cimento ao longo do tempo, têm influência sobre a RES do concreto.

Esse comportamento é explicado pelo fato da resistividade elétrica depender da estrutura de poros capilares e também das fases do C-S-H. A disponibilidade de

íons condutivos na solução aquosa presente nos poros, alidada à conectividade e tortuosidade dos poros tem influência determinante na resistividade elétrica (LIU, 2014). Segundo Bijen (1996, *apud* MEDEIROS-JUNIOR, 2017), o efeito fíler, causado pela adição pozolânica, contribui com o aumento da densidade do concreto e tortuosidade dos poros. Isso acontece quando partículas de diâmetro menor ou igual às partículas do clínquer são adicionadas ao sistema cimentício.

É possível observar na Figura 54, que a REV de todas as amostras cresceu no decorrer do progresso de hidratação do cimento. Isso está de acordo com as observações de Liu *et al.* (2014) e Medeiros-Junior e Gans (2017). Os resultados dos traços TR, TCV e TSCA, em todo o tempo de observação, apresentaram-se crescente.

A sílica de casca de arroz (TSCA) pode ter contribuído com o incremento da resistividade elétrica após os 28 dias, e com mais intensidade após os 56 dias, pelo refinamento dos poros e densificação da matriz cimentícia através da reação pozolânica. Esse comportamento foi também observado por Jamil *et al.* (2016).

A REV do traço de referência foi superada pela REV dos traços TM, TSCA e TCV depois dos 28 dias, pela ação dos MCS. TF apresentou resultados de crescimento inicial de REV, com tendência de estabilização depois dos 56 dias. O fíler calcário (TF), por se tratar de um MCS inerte, provavelmente contribuiu apenas com o efeito fíler até o momento estabilização da resistividade. Entretanto esse efeito não superou o efeito da finura do cimento, inerente ao CP V. Esses comportamentos estão de acordo com observações de Medeiros-Junior e Gans (2017).

A respeito do desempenho dos MCS em mitigar o risco de corrosão através de sua influência na resistividade elétrica, pode-se observar na Figura 54 que o traço de referência atingiu o patamar de baixo risco de corrosão. Os traços com MCS reativos, TM, TCV e TSCA atingiram o patamar de risco de corrosão desprezível. Apenas o traço com fíler calcário, TF, apresentou baixo desempenho, permanecendo na faixa de alto risco de corrosão.

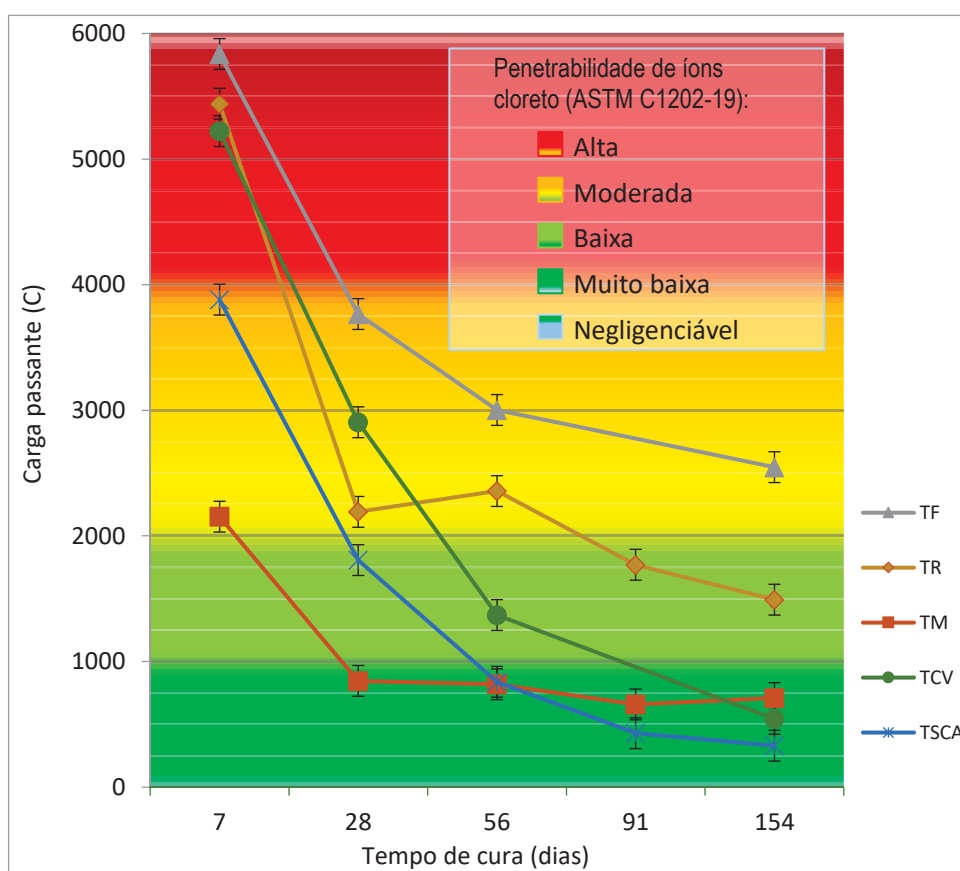
4.4 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

As leituras e resultados detalhados dos testes RCPT estão relatadas no Apêndice 5. O Quadro 53 registra as leituras, a quantidade de carga elétrica por corpo de prova, as médias, o desvio padrão e o coeficiente de variação, por traço. No Quadro 59, Tabela 55 e Tabela 56 demonstra-se uma análise de variância ANOVA em duas

vias e um teste de Tukey. Essa análise tem como fatores controláveis o tempo de hidratação do cimento e a composição de aglomerantes. O registro de resultados está na Tabela 57, no Apêndice 5.

A carga passante média por amostra está ilustrada na Figura 55, em contraponto com as faixas de avaliação de penetrabilidade de íons cloretos, de acordo com Whiting (1981) e ASTM C1202-19 (ver Tabela 5).

FIGURA 55 – PENETRABILIDADE DE ÍONS CLORETOS EM RELAÇÃO AO PROGRESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO



FONTE: O autor (2023).

De acordo com a Figura 55, observando-se a análise ANOVA e o teste de Tukey, a penetrabilidade de íons cloreto apresentou tendência a diminuir, com o progresso de hidratação do cimento. TM e TSCA demonstraram tendência de estabilização na faixa de muito baixa penetrabilidade, respectivamente depois dos 28 dias e dos 56 dias. TCV precisou de mais tempo para obter resultados nessa faixa. O traço de referência, TR, se apresentou com baixa penetrabilidade de íons cloreto depois dos 91 dias. TF foi o traço de menor desempenho no RCPT, com os melhores resultados chegando apenas, na faixa moderada.

A respeito do uso de MCS no concreto, pode-se observar na Figura 55, que cada um deles causa um impacto diferente sobre a penetrabilidade de íons cloreto. Dentre os materiais testados, os de maior impacto inicial são o metacaulim e a sílica de casca de arroz. Aos sete dias, os traços TM e TSCA já apresentaram resultados na faixa de penetrabilidade moderada, aos 28 dias, na faixas de baixa e muito baixa penetrabilidade. Enquanto isso, os resultados do traço de referência, TCV e TF aos sete dias, ainda encontravam-se na faixa de alta penetrabilidade, e aos 28 dias, na faixa moderada. Aos 154 dias, os MCS que surtiram impacto positivo em relação ao traço de referência, sobre a durabilidade do concreto exposto a íons cloreto, são: metacaulim, sílica de casca de arroz e cinza volante. O filer calcário, ao contrário das adições pozolânicas, surtiu efeito negativo na penetrabilidade de íons cloretos.

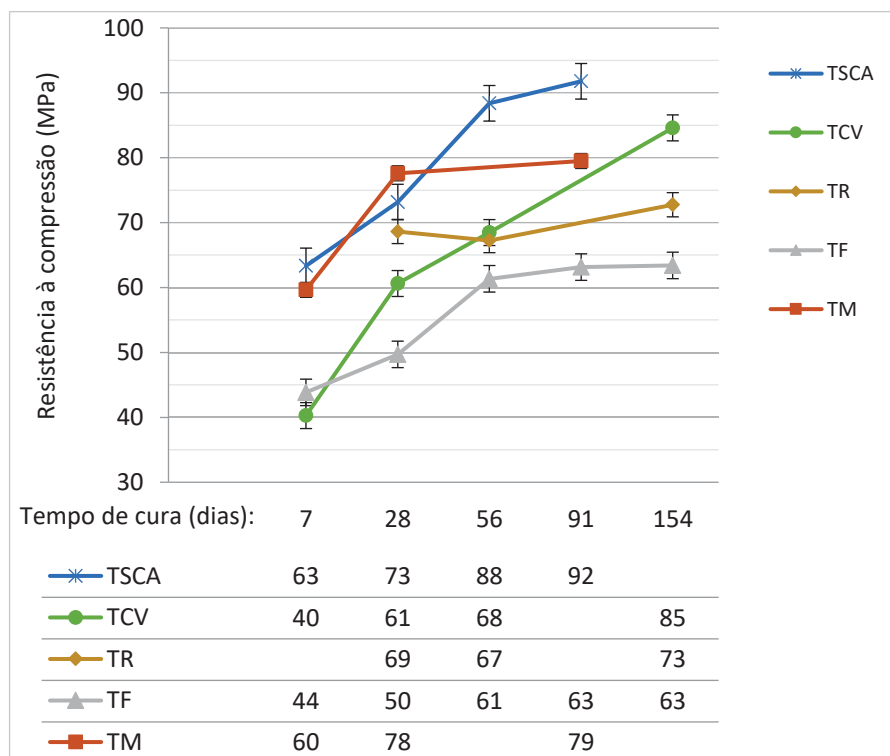
4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os registros, o tratamento estatístico e resultados dos ensaios de resistência à compressão podem ser apreciados no Apêndice 2. O Quadro 4 apresenta o tratamento estatístico dos dados, com eliminação de elementos espúrios. Análises de variância ANOVA e testes de Tukey, por traço e por tempo de hidratação do cimento, apresentados no Apêndice 2, auxiliaram na identificação de resultados incoerentes, que foram eliminados como elementos espúrios. A Tabela 45 apresenta os resultados. Duas análises, a primeira por tipo de aglomerante, com o tempo de hidratação do cimento como variável independente, a segunda, por tempo de hidratação, tomando a composição de aglomerantes como variável independente. Isso auxiliou na distinção dos grupos amostrais.

A Figura 56 apresenta os valores médios de resistência à compressão obtidos por traço, ao longo do tempo. Cada ponto de dado registrado no gráfico, representa a média de até seis corpos de prova, nos casos em que não foram eliminados dados espúrios. O erro estatístico indicado, por traço, com variação do tempo de cura – correspondente a três vezes o desvio padrão das médias, para mais e para menos. De acordo com as análises ANOVA e testes de Tukey, considerando o tempo de hidratação do cimento como variável independente, pode ser observado que a RC tende a crescer no decorrer do progresso de hidratação do cimento. Os resultados se mostraram estáveis a partir dos 28 dias, no caso do traço de referência e do traço TM,

e dos 56 dias, no caso de TF e TSCA. O traço TCV se mostrou crescente durante todo o tempo de observação.

FIGURA 56 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM RELAÇÃO AO PROGRESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO



FONTE: O autor (2023).

Considerando a composição de aglomerantes como variável independente, os testes de Tukey indicaram o seguinte a respeito das médias de RC:

- aos sete dias, TF e TCV não têm distinção estatística, tampouco TSCA e TM (ver Quadro 26 e Tabela 40);
- aos 28 dias, TSCA e TM não têm distinção estatística (ver Quadro 28 e Tabela 41);
- aos 56 dias, TR e TCV não têm distinção estatística (ver Quadro 30 e Tabela 42);
- aos 91 dias, TF, TM e TSCA apresentaram resultados distintos (ver Quadro 32 e Tabela 43);
- aos 154 dias, TF, TR e TCV apresentaram resultados distintos (ver Quadro 34 e Tabela 44).

Essas observações permitem concluir que a variação da composição dos aglomerantes, em função do uso de diferentes MCS, tem impacto no comportamento da RC no decorrer do progresso de hidratação do cimento. A sílica de casca de arroz

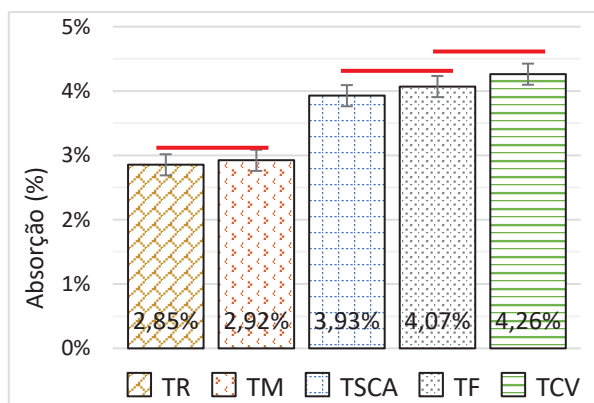
e o metacaulim aumentaram a RC, em relação a TR, a partir dos 28 dias, com incrementos de 6% e 13%, respectivamente. O efeito do uso de cinza volante foi observado depois dos 56 dias. Aos 154 dias, a RC de TCV se apresentou 16% maior do que a de TR. Por outro lado, o uso de fíler calcário como MCS reduziu a RC em 10% em relação a TR, aos 56 dias.

4.6 ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 154 DIAS DE CURA SUBMERSA

4.6.1 Absorção de água por imersão

No Apêndice 8, podem ser observados os registros do ensaio de absorção de água por imersão durante 72 horas, de acordo com a norma ABNT NBR 9778:2005. As leituras de massa dos corpos de prova estão registradas no Quadro 87. No Quadro 88 se encontram os resultados do ensaio. Os quadros Quadro 89, Quadro 90 e Tabela 63 apresenta-se uma análise ANOVA e teste de Tukey, a qual possibilitou identificarem-se as diferenças estatísticas entre grupos. A Figura 57 ilustra os resultados.

FIGURA 57 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO APÓS 154 DIAS DE CURA SUBMERSA



FONTE: O autor (2023).

Na Figura 57 formaram-se três grupos com taxa de absorção por imersão estatisticamente distinta, são eles: traços TR e TM; TSCA e TF; TF e TCV. Como se observa na Figura 57, de acordo com o teste de Tukey, os traços TF, TSCA e TCV apresentaram resultados de taxa de absorção por imersão aproximadamente 40% maiores do que o resultado do traço de referência.

O uso de metacaulim no traço TM, não acarretou em nenhum efeito significativo em relação ao traço de referência, fato que está de acordo com Real

(2015), embora a autora tenha testado aos 56 dias. O uso de cinza volante no trabalho da autora, teve efeito de redução de 10% de absorção de água, enquanto neste trabalho, observou-se efeito contrário, com incremento de 40%. Paralelamente, Real (2015) não identificou influência da sílica de casca de arroz em relação ao traço de referência.

O efeito do fíler calcário, traço TF, foi observado pelo incremento de 43% no índice de absorção em relação ao traço de referência. Isso está de acordo com a tendência observada por Rodrigues (2023), que observou incremento de 14%.

A Tabela 25 demonstra a avaliação de desempenho das amostras quanto a absorção de água por imersão à luz dos parâmetros propostos pela CEB 192 (1989).

TABELA 25 – CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DO CONCRETO EM FUNÇÃO DA ABSORÇÃO POR IMERSÃO, CONFORME O CEB 192 (1989)

Intervalo	Classificação	TR	TM	TSCA	TF	TCV
0% - 3%	Bom	2,85%	2,92%			
3% - 5%	Médio			3,93%	4,07%	4,26%
5% - 7%	Ruim					

FONTE: O autor (2023).

De acordo com a classificação apresentada na Tabela 25, o uso de sílica de casca de arroz, o fíler calcário e a cinza volante pioraram o desempenho do concreto em função de sua absorção. O uso de metacaulim, nesse caso, não apresentou nenhuma influência.

O resultado desse ensaio não está de acordo com as conclusões de diversos autores (BIJEN, 1996 *apud* MEDEIROS-JUNIOR; GANS, 2017; HOPPE FILHO, 2013; LIU, 2014; RAMEZANIANPOUR, 2011 *apud* YARAGHI, 2021; TIBBETTS, 2020), de que os MCS exercem influência na densificação da matriz, tortuosidade e refinamento dos poros, bem como na concentração iônica da solução aquosa presente nos poros, efeito que se reflete em menor permeabilidade do concreto.

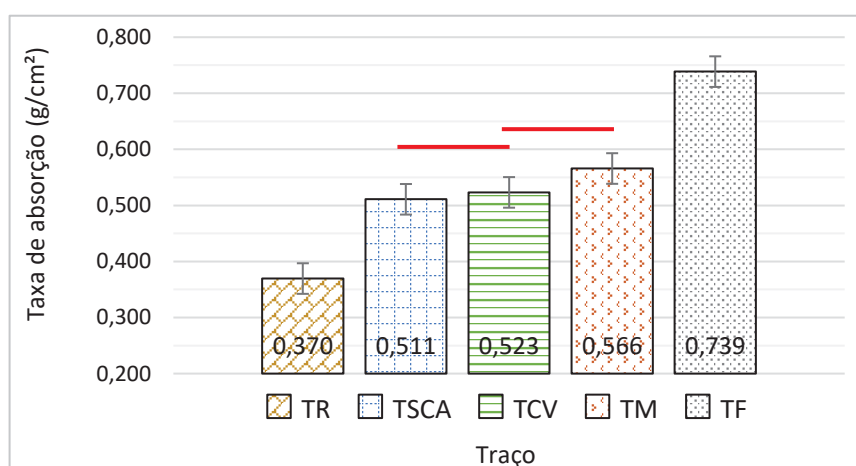
4.6.2 Absorção de água por capilaridade

Os registros do teste de absorção de água por capilaridade, de acordo com a norma ABNT NBR 9779:2012, podem ser observados no Apêndice 7. No Quadro 83, apresentam-se os resultados de médias amostrais, desvio padrão e coeficiente de variação, por leitura. O Quadro 84, demonstra os resultados após eliminação de elementos espúrios. A análise ANOVA e teste de Tukey, apresentados nos quadros

Quadro 85, Quadro 86 e Tabela 62 auxiliam na distinção estatística entre grupos, nos quais a variável independente é a composição de aglomerantes.

A Figura 58 apresenta as médias de absorção de água por capilaridade, por traço, obtidas após 72 horas de exposição. O erro estatístico representado é relativo à variação da composição de aglomerantes. Barras horizontais indicam amostras com resultados estatisticamente semelhantes.

FIGURA 58 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE APÓS 154 DIAS DE CURA SUBMERSA



FONTE: O autor (2023).

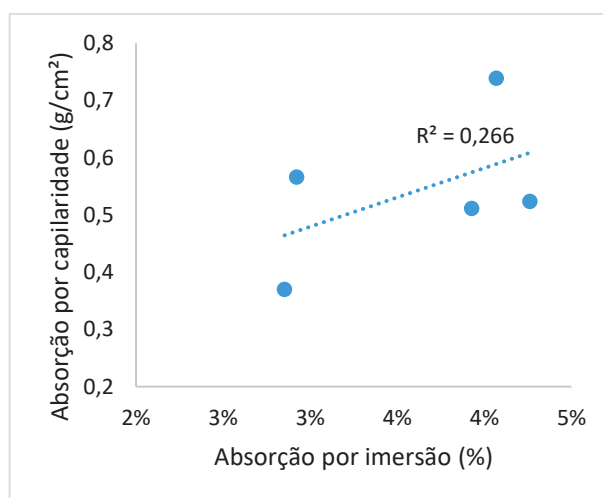
Observa-se na Figura 58, que há diferença estatística entre grupos. O traço de referência foi o que obteve a menor taxa de absorção por capilaridade. Logo em seguida, o grupo TSCA e TCV, que obtiveram resultados estatisticamente semelhantes, assim como TCV e TM. O uso de cinza volante, de sílica de casca de arroz ou de metacaulim proporcionaram em um aumento da taxa de absorção de aproximadamente 41% em relação ao traço de referência. TF apresentou a maior taxa de absorção, com diferença de 100% a mais do que TR. A distinção estatística entre grupos demonstrada, permite concluir que o uso de MCS teve impacto no resultado do ensaio.

Em seu experimento, Medeiros-Junior, Munhoz e Medeiros (2019) observaram que os traços com maiores quantidades de MCS tiveram coeficientes de absorção por capilaridades maiores, o que está de acordo com os resultados obtidos neste trabalho. De acordo com esses autores, forças capilares mais fortes, relacionadas à tensão superficial da água, são decorrentes do refinamento dos poros causados pelo uso de MCS até o limite de influência da tortuosidade dos poros. Isso pode ter levado os traços com MCS apresentarem maior índice de capilaridade.

4.6.3 Correlação entre absorção de água por imersão e por capilaridade após 154 dias de cura submersa

No gráfico da Figura 59 foram plotados todos os resultados de absorção por capilaridade em função da absorção por imersão. Observa-se que há pouca relação entre esses dados visto que o coeficiente de determinação da linha de tendência, R^2 , é de apenas 0,266.

FIGURA 59 – CORRELAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E POR CAPILARIDADE



FONTE: O autor (2023).

A pouca relação entre os resultados dos dois ensaios também pode ser identificada pela comparação entre a Figura 57 e a Figura 58. Nesse caso é possível perceber que em ambos os ensaios, a amostra que demonstrou menor absorção foi TR. Nos dois ensaios, TF está entre as maiores. No ensaio de absorção por capilaridade, TF apresenta o maior coeficiente de capilaridade, sendo 30% a mais em relação a TM. TM agrupa-se às amostras de resultados intermediários, no ensaio de absorção por imersão, já no ensaio de absorção por capilaridade, TM agrupa-se a TR, com resultados menores.

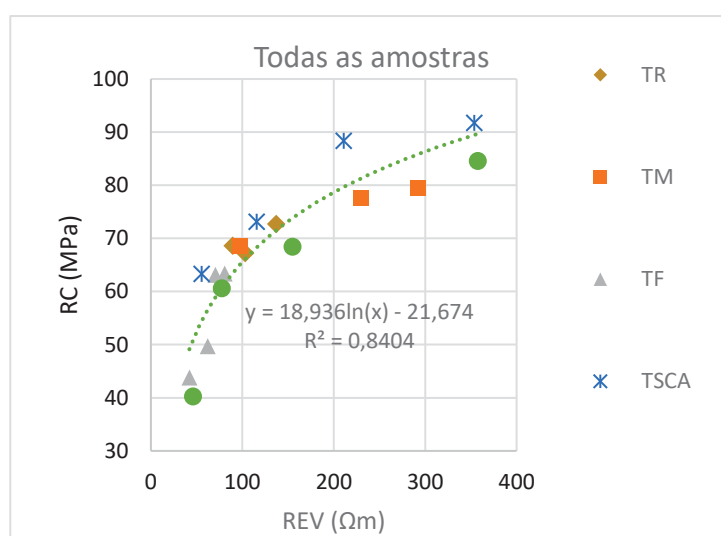
Real (2015), testou traços compostos por MCS similares obtendo baixa correlação entre esses dois tipos de teste de absorção de água. Por outro lado, Medeiros-Junior, Munhoz e Medeiros (2019) obtiveram correlação, com R^2 acima de 0,9, que segundo os autores, identifica alta dependência entre as propriedades, destacando sua influência na absorção e percolação de água na microestrutura do concreto.

4.7 CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO E PARÂMETROS DE DURABILIDADE

4.7.1 Resistência à compressão e resistividade elétrica

A correlação entre os resultados médios da RC e da REV entre todas as amostras e por traço, é demonstrada na Figura 60. Cada ponto no gráfico corresponde a uma média de resistência à compressão, e uma média de REV obtidas de seis corpos de prova.

FIGURA 60 – CORRELAÇÃO: RC X REV, ENTRE TODAS AS AMOSTRAS



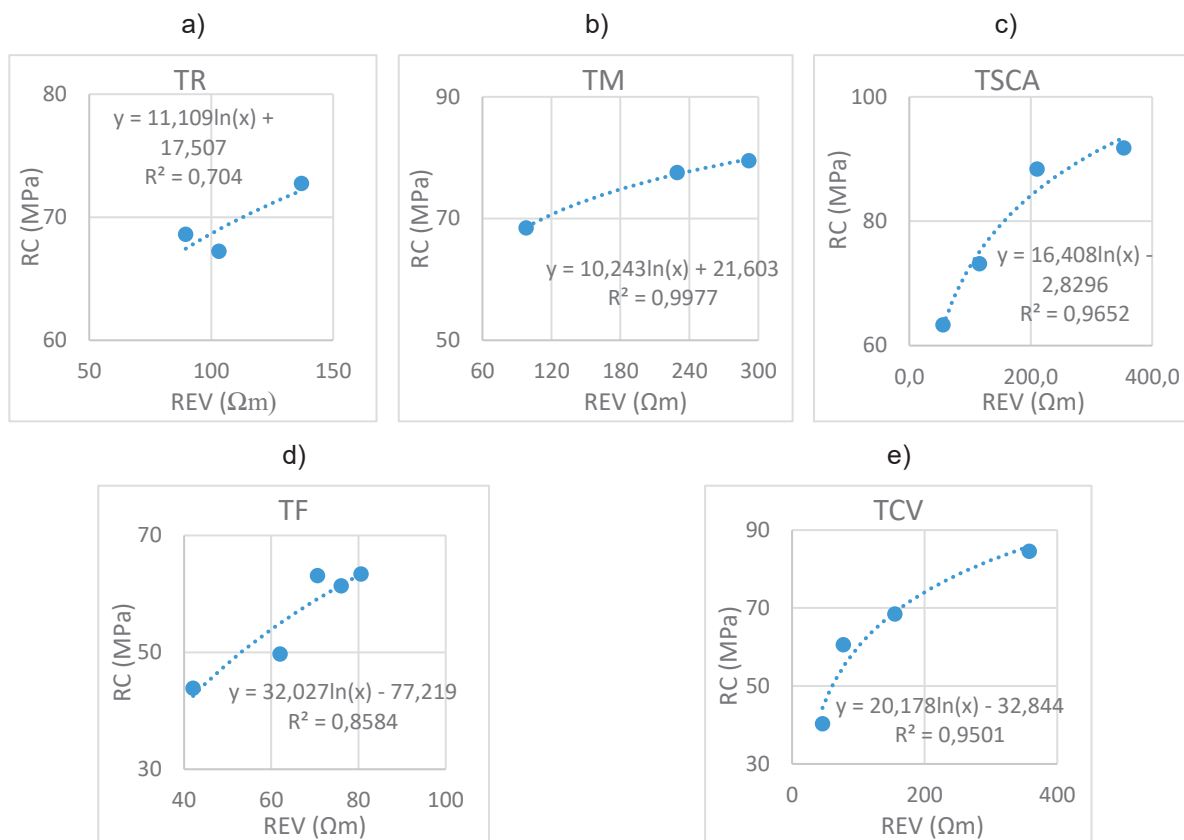
FONTE: O autor (2023).

Observa-se na Figura 60, que a REV e a RC crescem juntas no decorrer da experiência, o que está de acordo com Medeiros-Junior *et al.* (2014 e 2019), bem como Ramezaniapour *et al.* (2011). A correlação encontrada utilizando-se o conjunto de todas as amostras apresentou coeficiente de determinação R^2 igual a 0,84. Esse valor significa que a equação de correlação encontrada está explicando 84% do comportamento da RC em função da REV, o que é alto se comparado ao resultado de outras pesquisas. Ramezaniapour *et al.* (2011) encontraram correlações entre RC e RES com 57 traços de concreto em que apenas um tipo de cimento foi usado. A correlação encontrada entre os dados de todas as amostras de Ramezaniapour *et al.* (2011) apresentou R^2 igual a 0,43 (ver Figura 16(c)). Medeiros-Junior *et al.* (2014 e 2019) conduziram experimentos dessa natureza e observam que esse tipo de análise deve ser feito separadamente, para cada tipo de cimento, com diferentes

teores de MCS. Por essa razão a generalização do modelo encontrado neste trabalho deve ser feita com precaução.

A Figura 61 apresenta as correlações obtidas por tipo de MCS.

FIGURA 61 – CORRELAÇÃO: RC X REV, POR TIPO DE AGLOMERANTE: a) TR; b) TM; c) TSCA; d) TF; e) TCV



FONTE: O autor (2023).

A Figura 61 demonstra que, com exceção de TR, correlações com R^2 acima de 0,85, foram encontradas entre os resultados dos demais traços. Ramezaniapour *et al.* (2011) identificaram coeficientes de determinação similares quando a correlação foi feita por tipo de aglomerante (ver Figura 16(a) e Figura 16(b)).

Medeiros-Junior, Munhoz e Medeiros (2019), ao realizarem uma análise similar, compararam a inclinação de curvas RCxRES em concretos com diferentes teores de MCS, mas da mesma faixa de resistência à compressão. Essa análise permitiu aos autores identificarem a influência dos MCS no incremento da densidade da microestrutura, que é refletida na resistividade elétrica (ver Figura 15). Para os autores, a curva mais suave indica maior influência da ação do MCS no incremento da densidade da microestrutura. Na Tabela 26 observam-se os coeficientes angulares das curvas de correlação de cada mistura, por ordem de magnitude.

TABELA 26 – COEFICIENTE ANGULAR DA LINHA DE CORRELAÇÃO REV X RC, POR TRAÇO

Traço	TF	TCV	TSCA	TR	TM
$d/dx(f(x))$	32,027/x	20,178/x	16,408/x	11,109/x	10,243/x

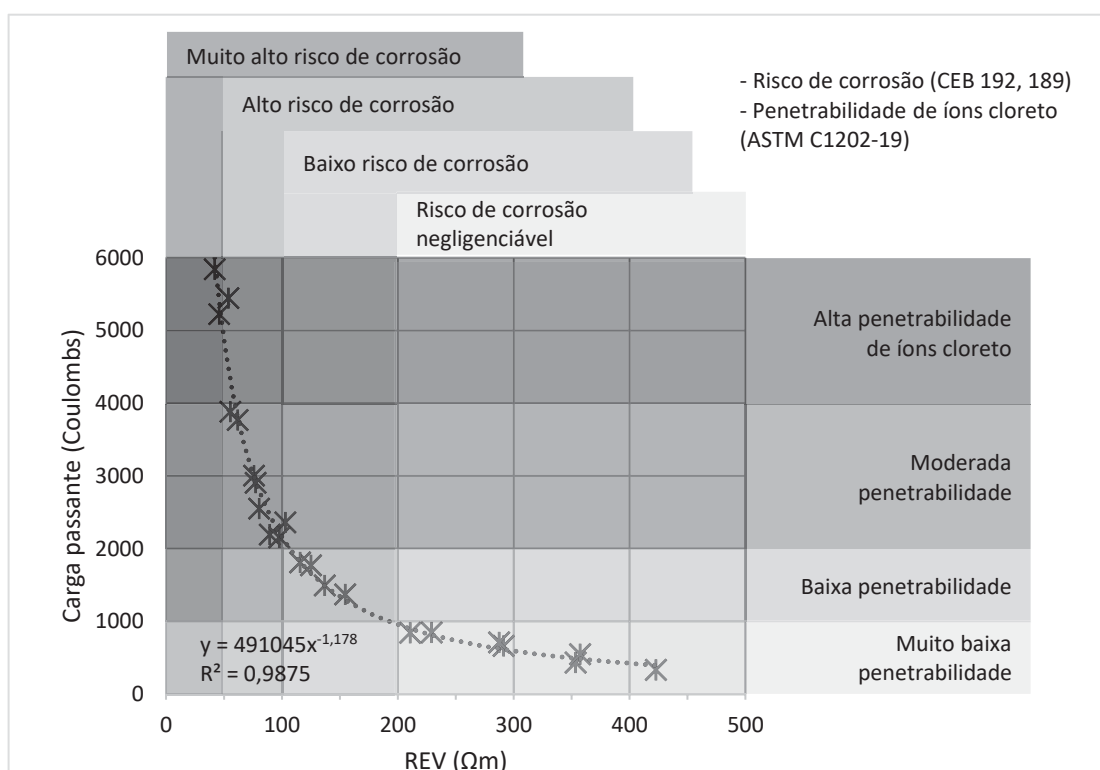
FONTE: O autor (2023).

A Tabela 26 demonstra que a curva mais suave é a TM, seguida por TR, enquanto a curva mais inclinada é a TF. Isso indica que o fíler calcário, em TF, tem a menor influência na densificação da microestrutura em relação aos outros MCS. A sílica de casca de arroz, em TSCA, apresentou uma curva de inclinação intermediária. Possivelmente, o maior efeito da sílica de casca de arroz na REV pode ter sido através da redução de íons condutivos na composição da solução aquosa presente nos poros, como observado por Tibbetts *et al.* (2020).

4.7.2 Resistência à penetração de cloretos pelo RCPT e resistividade elétrica

A correlação encontrada entre a REV e a carga passante está demonstrada na Figura 62. Cada ponto de REV corresponde à média de uma amostra composta de seis corpos de prova, enquanto cada amostra do teste RCPT foi composta de quatro corpos de prova.

FIGURA 62 – CORRELAÇÃO: RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS X REV



FONTE: O autor (2023).

A Figura 62 mostra que obteve-se uma correlação inversa entre a resistividade elétrica e a carga passante, com R^2 maior do que 0,98. Observa-se que enquanto a REV aumenta, a carga passante diminui. A composição de aglomerantes, aparentemente, não influencia na correlação apresentada. Essas observações estão de acordo com os achados de Torres-Acosta, Presuel-Moreno e Andrade (2019).

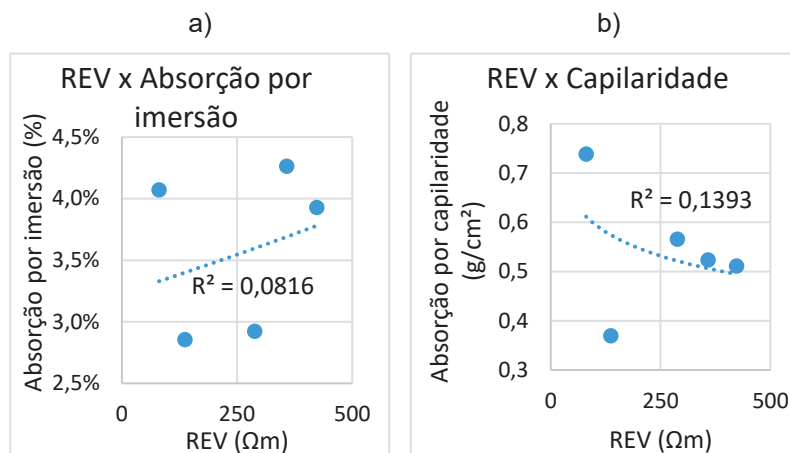
Analizando-se as faixas de avaliação de desempenho quanto ao risco de corrosão e à penetrabilidade de íons cloreto, a Figura 62 demonstra que: o conjunto de pontos pertencentes à faixa de alta penetrabilidade de íons cloreto está contido na faixa de muito alto risco de corrosão; o conjunto de pontos pertencentes à faixa de moderada penetrabilidade de íons cloreto está contido na faixa de alto risco de corrosão; os pontos pertencentes à faixa de baixa penetrabilidade está contido na faixa de baixo risco; e assim por diante. Portanto, pode-se concluir que há semelhança entre as avaliações de desempenho de acordo com a ASTM C1202-19 e com o CEB 192 (1989). Paralelamente, essa conclusão valida o método da REV extraída do RCPT e sua correlação com o método direto e com o método de Wenner.

Os fatos constatados ratificam as afirmações disponíveis na literatura científica (ANDRADE E WHITING, 1996; ASTM C1760-12; TORRES-ACOSTA, 2019), de que o RCPT seria um ensaio de resistência elétrica por seguir a lei de Ohm e de que, por essa razão, pode medir a resistividade elétrica do concreto.

4.7.3 Resistividade elétrica e absorção de água por imersão e por capilaridade

A correlação encontrada entre REV e absorção de água por imersão, por capilaridade e por índice de vazios é demonstrada na Figura 63. De acordo com a Figura 63, foram encontrados baixos coeficientes de determinação entre as correlações encontradas. Tal fato não está de acordo com os resultados obtidos por Medeiros-Junior, Munhoz e Medeiros (2019), tampouco com os de Yaraghi *et al.* (2021), que encontraram melhores correlações (ver Figura 21 e Figura 22). Entretanto, os dados desta análise foram coletados a partir de cinco tipos diferentes de concreto, o que pode justificar o fato evidenciado. Medeiros-Junior, Munhoz e Medeiros (2019), bem como Yaraghi *et al.* (2021) fizeram essa comparação entre concretos com o mesmo tipo de aglomerantes.

FIGURA 63 – CORRELAÇÃO ENTRE ABSORÇÃO DE ÁGUA X REV: a) POR IMERSÃO; b) POR CAPILARIDADE



FONTE: O autor (2023).

Tibbetts *et al.* (2022) agruparam tipos de MCS, sendo eles tradicionais ou alternativos. Os autores identificaram tendências distintas entre esses grupos em relação à correlação da resistividade com a absorção de água. Os MCS tradicionais, como o metacaulim e a cinza volante tendem a apresentar maior resistividade quanto menor sua permeabilidade a água; enquanto a influência da permeabilidade a água no grupo de MCS alternativos tem pouco impacto sobre sua resistividade elétrica (ver Figura 20). Segundo os autores isso ocorre porque os MCS alternativos incrementam a quantidade de íons condutivos na composição da solução aquosa presente nos poros, bem como a presença de sólidos condutivos na matriz da pasta endurecida.

O comportamento observado neste trabalho pode ter ocorrido pelo efeito dos MCS na composição da solução aquosa presente na microestrutura dos poros do concreto. Considere-se que essa é uma das principais características que governam o comportamento da resistividade elétrica no concreto (CHRISTENSEN, 1994; ACI 201.2R16, 2016). Sendo assim, a distribuição, conectividade, tortuosidade e tamanho dos poros, avaliada pelos parâmetros de absorção de água, é menor do que o impacto da variação da composição de aglomerantes. Isso está de acordo com os resultados apresentados por Real (2015, p.82).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A comparação entre os métodos direto, de Wenner e da REV extraída do RCPT, para medição de resistividade elétrica no concreto permitiu concluir que:

- a) correlações entre métodos, resumidas na Tabela 27, foram encontradas;

TABELA 27 – CORRELAÇÕES ENTRE OS MÉTODOS DIRETO, DE WENNER E DA REV EXTRAÍDA DO RCPT

Método X	Método Y	K (AENOR UNE 83988-2:2014)	Equação de correlação	Coefficiente de determinação (R ²)
Direto	Wenner	0,377*	$y = 1,0552 \cdot K \cdot x$	0,99
Direto	RCPT	Não aplicável	$y = 1,1508 \cdot x$	0,94
Wenner	RCPT	0,377*	$y = 1,1 \cdot K \cdot x$	0,95

NOTA - *válido para CP cilíndrico de dimensões 100 mm x 200mm (diâmetro x comprimento), com espaçamento entre eletrodos igual a 50 mm.

FONTE: O autor (2023);

- b) a generalização das correlações apresentadas está sujeita à variabilidade inerente dos métodos;
- c) o método da REV extraída do RCPT pode substituir o método direto quando não se dispõe de um resistivímetro;
- d) confirmou-se um dos valores teóricos da constante de correção de célula, ou fator de forma, proposto por Morris, Moreno e Sgüés (1996), bem como pela norma AENOR UNE 83988-2:2014.

A respeito do efeito dos MCS e da evolução do progresso de hidratação sobre a resistividade elétrica do concreto, este trabalho permitiu concluir que:

- a) o emprego do fíler calcário (contido no cimento CP II-F), não contribui com a mitigação do risco de corrosão, de acordo com o CEB 192 (1989), nem com a redução da penetrabilidade a íons cloreto, de acordo com a ASTM C1202-19;
- b) o emprego de sílica de casca de arroz (10%), cinza volante (25%) ou metacaulim (10%), contribuem com a mitigação do risco de corrosão, bem como com a redução da penetrabilidade a íons cloreto;

- c) o emprego de diferentes MCS determina diferentes tendências de intensidade de crescimento e estabilização de magnitude da resistividade elétrica, como se demonstra na Tabela 28;

TABELA 28 – COMPORTAMENTO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO EM RELAÇÃO AO TRAÇO DE REFERÊNCIA

MCS	Teor de substituição	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias	154 dias
Fíler calcário	11% a 25%	-22%	-31%	-26%	-31%	-41%
Metacaulim	10%	+81%	154%	-	134%	110%
Cinza volante	25%	-15%	-14%	+50%	-	161%
Sílica de casca de arroz	10%	4%	29%	105%	183%	209%

FONTE: O autor (2023);

- d) esse comportamento decorre da evolução da reação pozolânica, que através efeito fíler, contribui com a densificação da matriz cimentícia e tortuosidade dos poros, e que através da diminuição da disponibilidade de íons condutivos na solução aquosa presente nos poros, contribui com a diminuição da condutividade;
- e) a redução da quantidade de solução aquosa disponível nos poros, em decorrência do progresso da hidratação, contribuiu com o crescimento da resistividade.

Com relação ao efeito dos MCS na absorção de água por imersão, identificou-se que o efeito da densificação da matriz cimentícia decorrente da reação pozolânica, pode ser menor do que o efeito da alteração na composição química da solução aquosa presente nos poros.

Quanto ao efeito dos MCS sobre a absorção de água por capilaridade, este trabalho permitiu concluir que a maior sucção capilar dos traços compostos pelos MCS reativos, pode ser explicada pelo fato do incremento das forças capilares relacionadas à tensão superficial da água decorrente do refinamento dos poros, até o limite de influência da tortuosidade e da despercolação dos poros capilares.

As faixas de avaliação de desempenho propostas pela ASTM C1202-19 (em relação a penetrabilidade de íons cloreto) e pelo CEB 192 (1989) (risco de corrosão em função da resistividade elétrica do concreto) estão de acordo uma com a outra.

As correlações encontradas entre a resistividade elétrica do concreto e a resistência à compressão são proporcionalmente diretas, a resistividade elétrica

cresce na medida que a resistência à compressão cresce. Tanto nas análises separadas por tipo de aglomerante, como na análise de todas as amostras juntas, os índices de correlação foram superiores a 70%.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Investigar a evolução da resistividade elétrica para misturas compostas de sílica de casca de arroz em idades superiores a 156 dias.

Melhorias do aparato de medição de resistividade pelo método direto, tais como:

- a) automatizar para fornecer leituras diretas, como o Resipod;
- b) -substituir as placas de alumínio dos eletrodos por placas de aço inoxidável ou de cobre;
- c) -substituir os tirantes elásticos por molas com engates rápidos;
- d) usar um voltímetro com precisão de no mínimo 0,001 V, na faixa de 1 V a 10 V; um amperímetro com precisão de no mínimo 0,001 mA, na faixa de 0,1 mA a 10 mA; com o gerador de funções ajustado em amplitude de onda igual a 20 Vpp.

Confirmar a frequência na qual o ângulo de fase é mais próximo de zero, em misturas com diferentes tipos de aglomerantes, ao longo do tempo.

Determinar a variabilidade dos métodos de medição de resistividade elétrica no concreto através do uso de maior quantidade de amostras. Minimizar o máximo de efeitos influenciadores sobre a resistividade elétrica do concreto, de acordo com Spragg (2011, *et al.* 2013), bem como de Gowers e Millard (1999).

Considerando-se as correlações obtidas entre a resistividade elétrica do concreto e absorção de água por imersão e por capilaridade, sugere-se testar as correlações com diferentes MCS, aos 56 dias, 91 dias e 154 dias de hidratação do cimento.

5.3 ARTIGOS PUBLICADOS, CURSOS MINISTRADOS E OUTRAS ATIVIDADES DE PESQUISA

Artigo publicado: REAL, L. V.; MEDEIROS, M. H. F.; RIVAROLA, G. B. Influência de pozolanas de alta resistividade no fator de idade do modelo de vida útil

de Andrade (2004). **Revista técnico-científica do CREA-PR**, edição especial, p.1-12, set. 2019.

Curso ministrado: MEDEIROS, M. H. F.; ARAÚJO, E. C. RIVAROLA, G. B. Inspeção em Estruturas de Concreto Armado com Corrosão de Armaduras: Diagnóstico e Prognóstico. (8 horas) Semana Acadêmica CESEC/TC/UFPR – 40 anos. Universidade Federal do Paraná, Jun. 2022.

Artigos em desenvolvimento:

- a) Durabilidade de estruturas de concreto armado sujeitas à penetração de cloretos: estimativa de vida útil e emprego de materiais cimentícios suplementares
- b) Correlação entre a resistividade elétrica superficial do concreto, resistência à compressão e resistência à penetração de cloretos
- c) Análise hierárquica: desempenho de concretos considerando a sustentabilidade, durabilidade e economia

Código de programação de computadores, desenvolvido em linguagem Python: Correlação entre resultados obtidos pelo ensaio resistividade elétrica superficial, pelo método de Wener, e pelo método de migração de cloretos.

REFERÊNCIAS

AASHTO. **AASHTO T358**: Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Washington: AASHTO, 2019.

ABNT – **ABNT NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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

ABNT – **ABNT NBR 9204**: Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica-volumétrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

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

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

ACI. **ACI 201.2R-16**: Guide to durable concrete. Farmington Hills: ACI, 2016.

AENOR. **UNE 83988-1**: Durabilidad del hormigón – Métodos de ensayo – Determinación de la resistividad eléctrica – Parte 2: Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 1: Método directo (método de referencia). Madrid: AENOR, 2008.

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.

ALIZADETH, R.; GHODS, P. GHODS, A., H.; SALEHI, M. **Electrical methhods and systems for concrete testing**. Giatec Scientific Inc. US10775332. 13 mai. 2015. 15 set. 2020.

ALTOUBAT, S.; MAALEJ, M.; SHAIKH, F. U. A. Laboratory Simulation of Corrosion Damage in Reinforced Concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, n. 3, p. 383–391, 2016.

ANDRADE, C.; ALONSO, C. On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. **Construction and Building Materials**, v. 15, n. 2, p. 141–145, 2001.

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

ANDRADE, C. Calculation of initiation and propagation periods of service-life of reinforcements by using the electrical resistivity. **International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering**, RILEM Symposium, Evanston, 2004.

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 fo Infrastructure**. Delft. Oct. 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 May 2011.

ANDRADE, C.; REBOLLEDO, N.; CASTILLO, A.; TAVARES, F.; PÉREZ, R.; BAZ, M. Evaluación de mezclas de hormigón para el nuevo canal de Panamá mediante la medida de la resistividad y la resitencia a la difusión de cloruros. **XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción**, Colombia, 2013.

ANDRADE, C.; D'ANDREA, R.; REBOLLEDO, N. Chloride ion penetration in concrete: The reaction factor in the electrical resistivity model. **Cement and Concrete Composites**, v. 47, p. 41–46, 2014.

ANDRADE, C.; WHITING, D. A comparison of chloride ion diffusion coefficients derived from concentration gradients and non-steady state accelerated ionic migration. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 29, n. 8, p. 476–484, 1996.

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, p. 126659, 2022.

ASTM. **C1202-19**: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

ASTM. **C1760-12**: Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete. West Conshohocken: ASTM International, 2012.

ASTM. **C1876-19**: Standard Test Method for Bulk Electrical Resistivity or Bulk Conductivity of Concrete. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

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.; 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, p. 106167, 2019.

BALESTRA, C. E. T.; REICHERT, T. A.; SAVARIS, G.; PANSERA, W. A.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Non destructive method for estimation of chloride profiles: correlation between electrical resistiviety and Holliday-empirical equation. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 146, i. 10, 2020.

BRAMESHUBER, W; RAUPACH, M. Non-destructive determination of the water-content in the concrete cover using the multiring-electrode – Part I: Aspects of concrete technology. International Symposium. **Non-destructive Testing in Civil Engineering**. 1993.

BROOMFIELD, J.; MILLARD, S. Current practice sheet no.128: Measuring concrete resistivity to assess corrosion rates. **Concrete (London)**, v. 36, p. 37–39, 2002.

CHIA, K. S.; ZHANG, M. H. Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 4, p. 639–645, 2002.

CHRISTENSEN, B. J.; COVERDALE, T.; OLSON, R. A.; et al. Impedance Spectroscopy of Hydrating Cement-Based Materials: Measurement, Interpretation, and Application. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 77, n. 11, p. 2789–2804, 1994. John Wiley & Sons, Ltd.

COPPIO, G.; LIMA, M.; LENCIONI, J. CIVIDANES, L.; DYER, P.; SILVA, S. Surface electrical resistivity and compressive strength of concrete with the use of waste foundry sand as aggregate. **Construction and Building Materials**, V. 212, p. 514-521, Abr 2019.

DONG, B.; ZHANG, J.; WANG, Y.; FANG, G.; LIU, Y.; XING, F. Evolutionary trace for early hydration of cement paste using electrical resistivity method. **Construction and Building Materials**. Vol. 119. Ago. 2016.

FELIU, S.; ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A.; ALONSO, C. A new method for in-situ measurement of resistivity of reinforced concrete. **Materials and Structures**, vol.29, pp. 362-365. Jul. 1996.

FELIU, S.; GONZALEZ, J. A.; FELIU, JR., S.; ANDRADE, M. C. Confinement of the electrical signal for in situ measurement of polarization resistance in reinforced concrete. **ACI Materials Journal**, v. 87, n. 5, p. 457–460, 1990.

GERMANN INSTRUMENTS. **Catalog NDT 2014**: NDT systems – Bridging NDT Theory and practice. P. 88-93. Evanston: Germann Instruments Inc., 2014. Disponível em: <http://germann.org/Brochures/Catalog-NDT-2014.pdf>. Acesso em 10/08/2021.

GIATEC SCIENTIFIC. **User manual**: Smart box. Ottawa: Giatec Scientific Inc. Disponível em: https://giatecscientific.com/documents/Shared_Documents/1.0_External_Resources/1.8_SmartBox/Technical_support_resources/SmartBox_Manual_V1.1.pdf?_gl=1*1fkW73o*_ga*MTc3NzA4MTgzMi4xNjI4NjM0Mzcw*_ga_11MRS7C64V*MTYyODY0MjkzMC4yLjEuMTYyODY0MzE5Ny4w. Acesso em 10/08/2021.

GIATEC SCIENTIFIC. **RCON™**. Ottawa: Giatec Scientific Inc. Disponível em: CONCRETE BULK RESISTIVITY TEST (giatecscientific.com). Acesso em 21/05/2023.

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

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares**. Dissertação (mestrado). PPGECC, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GOWERS K. R.; MILLARD, S. G. Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 5, 1999.

FERNANDES, J.; GONZAGA, L. Olha pro céu. **RCA Victor** – 78 RPM V800773b. Brasil, 1951.

HASEGAWA, T.; MAKOTO, H.; INOUE, H.; MINAGAWA, H. **Method and apparatus for measuring electrical resistivity**. JP5156867B1. Mitsui Eng & Shipbuild Co. Ltd.; Tohoku University. 18 abr. 2012. 06 mar. 2013.

HERMAN, R. An introduction to electrical resistivity in geophysics. **American Journal of Physics**. V. 69(9). Set. 2001.

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. **Sistemas Cimento, Cinza Volante e Cal Hidratada: Mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

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.

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

ICEL MANAUS. **Manual de instruções do gerador de ondas arbitrárias modelo GV-2015**. 2020. Disponível em: <http://www.icel-manaus.com.br/download.php>. Acesso em 01/12/2022.

ITAMBÉ. **CP II-F-32 - Cimento Portland composto com filler - Relatórios de ensaio - Set 2022**. Disponível em: https://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/themes/blade/_assets/pdf/relatorios/2022-9/CP-II-F-32.pdf. Acesso em 02/03/2023, 11:35.

ITAMBÉ. **CP V-ARI - Relatórios de ensaio - Ago 2022**. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/wp->

content/themes/blade/_assets/pdf/relatorios/2022-8/CP-V-ARI.pdf. Acesso em 02/03/2023, 10:58.

JAMIL, M.; KHAN, M. N. N.; KARIM, M. R.; KAISH, A. B. M. A; ZAIN, M. F. M. Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 185–198, 2016.

KIM, S. D.; LEE, H. G.; MOON, D. Y. **Electrode holder for a surface resistivity measuring device of concrete and the measuring device having the electrode holder**. KR101807503B1. Kyung Sung University Industry Cooperation Foundation. 07 nov. 2016. 11 dez. 2017.

KOLEVA, D. A.; COPUROGLU, O.; BREUGEL, K. VAN; YE, G.; WIT, J.H.W. de. Electrical resistivity and microstructural properties of concrete materials in conditions of current flow, **Cement Concrete Composites**, v. 30 (8), p. 731–744, 2008.

KONEČNÝ, P.; HORŇÁKOVÁ, M.; LEHNER, P.; ROVNANÍKOVÁ, P.; SÝKORA, M. Model uncertainty in diffusion coefficient for chloride ingress into concrete. **Procedia Structural Integrity**, v. 31, p. 147–153, 2021.

KONEČNÝ, P.; LEHNER, P.; PONIKIEWSKI, T.; MIERA, P. Comparison of chloride diffusion coefficient evaluation based on electrochemical methods. **Procedia Engineering**, v. 190, p. 193-198, 2017.

LAYSSI, H.; GHODS, P.; ALIZADEH, A.; SALEHI, M. Electrical Resistivity of Concrete. **Concrete International**, v. 37, p. 41–46, 2015.

LIU, T.; WEYERS, R. W. Modeling the Dynamic Corrosion Process in Chloride Contaminated Concrete Structures. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 3, p. 365–379, 1998

LIU, Z.; ZHANG, Y.; JIAN, Q. Continuous tracking of the relationship between resistivity and pore structure of cement pastes. **Construction and Building Materials**. Vol. 53. Feb. 2014.

MEDEIROS, M. H. F. Estudo de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado. **Engenharia Civil**, n. 12, p. 55-64, 2001.

MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A.; GROENWOLD, J.; MARCONDES, C. G.; HELENE, P. Hormigón armado de alta resistencia con metacaolín y humo de sílice en ambiente marino: un trabajo experimental. **Hormigón y Acero**, v. 63, p. 53-66, 2012.

MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A.; GROENWOLD, J. A.; HELENE, P. Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 66, p. 59-65, 2013.

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

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; GANS, P. Efeito da Adição de Pozolana na Resistividade Elétrica Superficial do Concreto. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 3, 28 ago. 2017.

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-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, p. 113 - 128, 30 May 2014.

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 pozzolana. **Revista Alconpat**, v. 9, n. 2, pp. 152-162, mai.-ago. 2019.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials: **McGraw Hill Professional**. New York, 2013.

MILLARD, S. G.; DAVIES, C. D.; BUNGEY, J. H. Behaviour of steel-reinforced concrete armour units used in coastal defences. **Coastal Engineering**, v. 14, n. 1, p. 57–81, 1990.

MILLARD, S.G.; GHASSEMI, M. H.; BUNGEY, J. H.; JAFAR, M. I. Assessing the electrical resistivity of concrete structures for corrosion durability studies. **Third International Symposium Corrosion of Reinforcement in Concret**, London, UK, 1990.

MINAGAWA, H.; MIYAMOTO, S.; KURASHIGE, I.; HISADA, M. Appropriate geometrical factors for four-probe method to evaluate electrical resistivity of concrete specimens. **Construction and Building Materials**, v. 374, p. 130784, 2023.

MORRIS, W.; MORENO, E. I.; SAGÜÉS, A. A. Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 12, p. 1779–1787, 1996.

NGUYEN, A. Q.; KLYSZ, G.; DEBY, F.; BALAYSSAC, J. P. Evaluation of water content gradient using a new configuration of linear array four-point probe for electrical resistivity measurement. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 308–322, 2017

NEITHALATH, N.; WEISS, J.; OLEK, J. Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements. **ResearchGate**. N. 315, p. 1–22, 2006.

NEWLANDS, M., D.; JONES, M., R.; KANDASAMI, S.; HARRISON, T. A. Sensitivity of electrode contact solutions and contact pressure in assessing electrical resistivity of concrete. **Materials and Structures**. V. 41, p. 621-632. Jun, 2008.

OH, B. H.; JANG, B. S. Chloride diffusion analysis of concrete structures considering effects of reinforcements. **ACI Materials Journal**, v. 100, n. 2, p. 143–149, 2003.

OLIVEIRA, D. R. B. **Avaliação de durabilidade de concretos utilizando areia 100% artificial e com substituição parcial do cimento portland por fíler calcário**. Dissertação (mestrado). PPGECC. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

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.

POLDER, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation. **Construction and Building Materials**, v. 15, n. 2, p. 125–131, 2001.

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.

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

ROBLES, K., P., V.; KIM, D.-W.; YEE, J.-J.; LEE, J.-W.; KEE, S.-H. Electrical resistivity measurements of reinforced concrete slabs with delamination defects. **Sensors**, v. 20, p. 7113, 2020.

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, p. 121240, 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.

RUPNOW, T., D.; ICENOGLE, P., J. Surface resistivity measurements evaluated as alternative to rapid chloride permeability test for quality assurance and acceptance.

Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, V. 2290 (1), p. 30-37, 2012.

RUOSHUI. **Products – Digital multimeter – 9808+**. [2022]. Disponível em: <http://www.victorruoshui.com/Products>. Acesso em 01 dez. 2022.

SOUZA, D. J. **Capacidade de adições minerais em mitigar o ataque por sulfatos de sódio e magnésio em argamassas de cimento portland**. Dissertação (mestrado), PPGECC, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

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.

SPRAGG, R.; VILANI, C.; SNYDER, K.; BENTZ, D.; BULLARD, J. W.; WEISS, J. Factors that influence electrical resistivity measurements in cementitious systems. **Journal of the Transportations Research Board**, n. 2342, p. 90-98, 2013.

TIBBETTS, C. M.; PARIS, J. M.; FERRARO, C. C.; RIDING, K. A.; TOWNSEND, T. G. Relating water permeability to electrical resistivity and chloride penetrability of concrete containing different supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 107, p. 103491, 2020.

TOMLINSON, D.; MORADI, F.; HAJILOO, H.; GHODS, P.; ALIZADETH, A.; GREEN, M. Early age electrical resistivity behavior of various concrete mixtures subject to low temperature cycling. **Cement and Concrete Composites**, Vol. 83, p. 323-334, Ago 2017.

TORRES-ACOSTA, A. A.; PRESUEL-MORENO, F. J.; ANDRADE, C. Electrical resistivity as durability index for concrete structures. **ACI Materials Journal**, v. 116, n. 6, p. 245–253, 2019.

WEI, X.; XIAO, L.; LI, Z. Prediction of standard compressive strength of cement by the electrical resistivity measurement. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 341-346, Jun 2012.

WHITING, D. **Rapid determination of the chloride permeability of concrete**. Final report FHWA/RD-81/119. Offices of Research and Development – Federal Highway Administration – U.S. Department of Transportation. Washington, 1981.

WOSNIACK, L. M.; REAL, L. V.; SILVA, M. D.; MACIOSKI, G.; HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS, M. H. F. de. Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 3, p. 321-340, jul./set. 2021.

YADAK YARAGHI, A. H.; RAMEZANIANPOUR, A. M.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; BAHMAN-ZADEH, F.; ZOLFAGHARNASAB, A. Evaluation of test procedures for durability and permeability assessment of concretes containing calcined clay. **Journal of Building Engineering**, v. 58, p. 105016, 2022.

ZHANG, S.; DONG, X.; ZHANG, H.; DENG, M. Research on deterioration mechanism of concrete materials in an actual structure. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2014, article ID 306459, 6 pages, 2014.

APÊNDICE 1 – AMOSTRAS

QUADRO 1 – TRAÇO ABSOLUTO

Traços	Cimento	MCS	Areia	Brita	Água	Aditivo
TR	39,44	0,00	84,00	105,00	15,75	0,315
TM	35,44	3,94	84,00	105,00	15,75	0,329
TF	49,48	0,00	105,38	132,10	19,79	0,295
TSCA	35,44	3,94	84,00	105,00	15,75	0,256
TCV	29,53	9,84	84,00	105,00	15,75	0,206

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 2 – TRAÇO UNITÁRIO

Traços	Cimento	MCS	Areia	Brita	Relação a/a	Slump
TR	1,00	-	2,13	2,66	0,407	90 mm
TM	0,90	0,10	2,13	2,67	0,408	90 mm
TF	1,00	-	2,13	2,67	0,406	105 mm
TSCA	0,90	0,10	2,13	2,67	0,406	110 mm
TCV	0,75	0,25	2,13	2,67	0,405	110 mm

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 3 – ENSAIOS REALIZADOS E AGRUPAMENTO DAS AMOSTRAS

(Continua)

Amostra	CP cilíndrico (D x H, mm)		Testes					
	100 x 200	100 x 50	RES	REV	RC	RCPT	Capilaridade	Índice de vazios
Traço "x" 7 dias	Tx1		X	X	X			
	Tx2		X	X	X			
	Tx3		X	X	X			
	Tx4		X	X	X			
	Tx5		X	X	X			
	Tx6		X	X	X			
	Tx7 ==>	Fatia Tx7A					X	
		Fatia Tx7B					X	
	Tx8 ==>	Fatia Tx8A					X	
		Fatia Tx8B					X	
Traço "x" 28 dias	Tx9		X	X	X			
	Tx10		X	X	X			
	Tx11		X	X	X			
	Tx12		X	X	X			
	Tx13		X	X	X			

QUADRO 3 – ENSAIOS REALIZADOS E AGRUPAMENTO DAS AMOSTRAS

(Continuação)

Amostra	CP cilíndrico (D x H, e mm)		Testes					
	100 x 200	100 x 50	RES	REV	RC	RCPT	Capilaridade	Índice de vazios
Traço "x" 28 dias	Tx14		X	X	X			
	Tx15 ==>	Fatia Tx15A					X	
		Fatia Tx15B					X	
	Tx16 ==>	Fatia Tx16A					X	
		Fatia Tx16B					X	
Traço "x" 56 dias	Tx17		X	X	X			
	Tx18		X	X	X			
	Tx19		X	X	X			
	Tx20		X	X	X			
	Tx21		X	X	X			
	Tx22		X	X	X			
	Tx23 ==>	Fatia Tx23A					X	
		Fatia Tx23B					X	
	Tx24 ==>	Fatia Tx24A					X	
		Fatia Tx24B					X	
Traço "x" 91 dias*	Tx25**							
	Tx26**							
	Tx27**							
	Tx28**							
	Tx29**							
	Tx30		X	X	X			
	Tx31		X	X	X			
	Tx32		X	X	X			
	Tx33		X	X	X			
	Tx34		X	X	X			
	Tx35		X	X	X			
	Tx36 ==>	Fatia Tx36A					X	
		Fatia Tx36B					X	
	Tx37 ==>	Fatia Tx37A					X	
		Fatia Tx37B					X	

QUADRO 3 – ENSAIOS REALIZADOS E AGRUPAMENTO DAS AMOSTRAS

(Conclusão)

Amostra	CP cilíndrico (D x H, mm)		Testes					
	100 x 200	100 x 50	RES	REV	RC	RCPT	Capilaridade	Índice de vazios
Traço "x" 154 dias	Tx38						X	
	Tx39						X	
	Tx40						X	
	Tx41							X
	Tx42							X
	Tx43 ==>	Fatia Tx43A				X		
		Fatia Tx43B				X		
	Tx44 ==>	Fatia Tx44A				X		
		Fatia Tx44B				X		
	Tx45		X	X	X			
	Tx46		X	X	X			
	Tx47		X	X	X			
	Tx48		X	X	X			
	Tx49		X	X	X			
	Tx50***		X	X	X			
Traço "TRb" 28 dias	TRb1				X			
	TRb2				X			
	TRb3				X			
	TRb4				X			
Traço "TRb" 56 dias	TRb5				X			
	TRb6				X			
	TRb7				X			
	TRb8				X			
Traço "TMb" 28 dias	TMb1				X			
	TMb2				X			
	TMb3				X			
	TMb4				X			
Traço "TRb" 56 dias	TMb5				X			
	TMb6				X			
	TMb7				X			
	TMb8				X			

NOTA: *O traço TCV não foi testado aos 91 dias;

**Os CPs Tx25, Tx26, Tx27, Tx28 e Tx29 foram descartados;

*** As séries amostrais dos traços TR e TF, de 91 dias possuem um CP a menos - nessas séries não existe o elemento Tx50.

FONTE: O autor (2023).

TABELA 29 – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA

(Continua)

CP	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Seção transversal (mm ²)	Comprimento (mm)
TR1	100,00	100,00	7853,75	198,60
TR2	99,00	98,20	7635,38	200,00
TR3	100,60	99,20	7838,05	198,50
TR4	100,90	100,10	7932,48	196,80
TR5	100,30	99,70	7853,75	199,40
TR6	100,50	100,30	7916,71	199,10
TR7A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TR7B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TR8A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TR8B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TR9	99,40	100,50	7845,90	196,90
TR10	99,20	99,40	7744,18	196,10
TR11	99,90	99,80	7830,21	196,10
TR12	99,20	99,40	7744,18	196,90
TR13	99,30	99,40	7751,98	196,40
TR14	100,10	100,50	7900,94	196,40
TR15A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TR15B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TR16A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TR16B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TR17	99,60	99,10	7751,98	197,50
TR18	99,90	100,50	7885,20	193,60
TR19	99,50	100,30	7838,05	197,10
TR20	100,30	99,70	7853,75	194,90
TR21	99,70	100,30	7853,75	194,70
TR22	100,40	99,60	7853,75	194,40
TR23A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TR23B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TR24A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TR24B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TR30	101,04	99,04	7860,03	193,06
TR31	99,74	99,45	7790,26	194,50
TR32	100,27	98,65	7769,16	196,67
TR33	100,27	99,85	7863,18	196,63
TR34	100,12	100,28	7885,20	195,33
TR35	99,61	99,96	7820,02	194,70
TR36A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TR36B	100,00	100,00	7853,75	50,00

TABELA 29 – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA

(Continuação)				
CP	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Seção transversal (mm²)	Comprimento (mm)
TR37B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TR43A	100,99	102,32	8115,86	52,32
TR43B	101,59	99,60	7947,49	52,44
TR44A	99,94	99,95	7845,11	52,83
TR44B	99,86	100,64	7893,07	53,13
TR45	99,80	99,82	7823,93	195,29
TR46	99,00	99,84	7762,91	194,61
TR47	100,07	100,42	7892,28	194,13
TR48	100,40	100,99	7963,30	194,16
TRb1	100,05	99,95	7853,75	195,00
TRb2	99,85	100,15	7853,75	195,45
TRb3	98,90	100,85	7834,13	196,00
TRb4	100,10	99,95	7857,68	195,00
TRb5	98,85	99,21	7702,12	194,00
TRb6	100,29	100,06	7881,26	191,95
TRb7	99,85	100,72	7898,58	188,35
TRb8	98,86	99,76	7745,74	194,33
TR49	100,34	100,98	7957,76	194,66
TM1	100,40	101,40	7995,75	197,40
TM2	99,70	100,30	7853,75	198,50
TM3	99,20	99,60	7759,79	197,10
TM4	99,20	99,30	7736,39	197,80
TM5	98,90	100,20	7783,23	196,50
TM6	100,10	101,10	7948,28	197,50
TM7A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TM7B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TM8A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TM8B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TM9	99,40	100,60	7853,75	191,00
TM10	99,60	100,50	7861,61	197,00
TM11	99,60	100,50	7861,61	194,90
TM12	99,20	100,10	7798,87	197,30
TM13	100,10	98,80	7767,60	196,50
TM14	99,30	100,30	7822,37	194,20
TM15A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TM15B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TM16A	100,00	100,00	7853,75	50,00

TABELA 29 – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA

(Continuação)				
CP	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Seção transversal (mm²)	Comprimento (mm)
TM16B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TM17	99,50	100,00	7814,53	195,70
TM18	100,00	99,00	7775,41	193,80
TM19	100,50	99,80	7877,33	190,20
TM20	99,30	99,90	7791,05	192,10
TM21	99,10	99,90	7775,41	190,40
TM22	101,40	99,80	7948,28	188,10
TM23A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TM23B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TM24A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TM24B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TM30	100,35	100,45	7916,71	193,10
TM31	100,15	100,20	7881,26	192,30
TM32	99,15	99,90	7779,32	195,10
TM33	99,85	100,10	7849,82	193,50
TM34	100,00	100,85	7920,65	194,63
TM35	99,25	99,25	7736,39	192,10
TM36A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TM36B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TM37A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TM37B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TM43A	100,23	100,38	7901,73	52,26
TM43B	100,14	99,92	7858,46	51,53
TM44A	99,85	99,76	7823,15	51,66
TM44B	99,80	100,72	7894,64	51,95
TM45	101,08	100,61	7987,04	195,80
TM46	99,38	98,93	7721,58	194,41
TM47	100,53	100,83	7960,92	193,39
TM48	99,04	99,49	7738,72	192,77
TM49	100,24	100,47	7909,61	188,39
TM50	99,81	99,01	7761,35	194,50
TMb1	99,85	100,15	7853,75	196,10
TMb2	98,90	101,00	7845,90	195,40
TMb3	100,05	99,90	7849,82	195,90
TMb4	99,90	100,05	7849,82	197,65
TMb5	100,33	100,80	7942,75	196,15

TABELA 29 – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA

(Continuação)				
CP	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Seção transversal (mm²)	Comprimento (mm)
TMb6	99,59	99,63	7792,61	194,13
TMb7	100,12	99,95	7859,25	197,65
TMb8	99,71	100,43	7864,75	195,50
TF1	99,90	100,10	7853,75	195,70
TF2	100,10	100,70	7916,71	196,50
TF3	100,10	100,30	7885,20	196,10
TF4	101,10	99,80	7924,59	197,10
TF5	99,90	99,30	7791,05	195,60
TF6	100,00	99,50	7814,53	196,30
TF7A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF7B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF8A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF8B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF9	100,50	99,60	7861,61	195,70
TF10	99,40	99,70	7783,23	195,80
TF11	99,60	99,70	7798,87	192,30
TF12	100,30	99,80	7861,61	196,50
TF13	99,60	100,10	7830,21	192,20
TF14	100,50	100,40	7924,59	195,40
TF15A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF15B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF16A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF16B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF17	100,00	100,10	7861,61	192,50
TF18	100,80	98,20	7775,41	190,50
TF19	99,30	98,20	7658,63	190,90
TF20	99,40	99,80	7791,05	192,40
TF21	99,40	99,30	7751,98	189,50
TF22	99,00	100,70	7830,21	190,50
TF23A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF23B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF24A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF24B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF30	100,10	99,75	7841,97	191,60
TF31	100,35	99,25	7822,37	194,15
TF32	99,60	100,00	7822,37	193,60

TABELA 29 – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA

(Continuação)				
CP	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Seção transversal (mm²)	Comprimento (mm)
TF33	100,00	100,20	7869,47	192,90
TF34	100,00	99,40	7806,70	193,10
TF35	100,90	98,80	7830,21	194,40
TF36A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF36B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF37A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF37B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TF43A	100,55	100,21	7913,55	51,65
TF43B	99,99	101,30	7955,39	51,53
TF44A	100,22	100,10	7878,90	52,16
TF44B	100,55	100,21	7913,55	52,41
TF45	100,18	99,91	7860,82	191,73
TF46	99,53	100,58	7862,39	196,37
TF47	99,68	99,42	7783,23	195,77
TF48	100,10	100,39	7892,28	194,82
TF49	100,22	99,66	7844,33	194,63
TSCA1	99,40	99,10	7736,40	198,10
TSCA2	99,20	99,80	7775,40	193,00
TSCA3	99,90	100,00	7845,90	196,80
TSCA4	100,60	100,70	7956,20	195,70
TSCA5	99,40	99,10	7736,40	196,60
TSCA6A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TSCA6B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TSCA7A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TSCA7B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TSCA6	99,80	100,00	7838,10	193,00
TSCA9	100,30	99,80	7861,61	191,10
TSCA10	99,90	99,30	7791,05	192,10
TSCA11	99,50	99,36	7764,47	190,90
TSCA12	100,50	100,60	7940,38	192,00
TSCA13	99,60	99,60	7791,05	190,20
TSCA14	99,40	99,90	7798,87	193,60
TSCA15A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TSCA15B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TSCA16A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TSCA16B	100,00	100,00	7853,75	50,00

TABELA 29 – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA

(Continuação)				
CP	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Seção transversal (mm²)	Comprimento (mm)
TSCA17	99,30	99,80	7783,23	184,80
TSCA18	99,90	99,80	7830,21	194,50
TSCA19	100,70	100,60	7956,18	190,50
TSCA20	99,30	100,10	7806,70	193,50
TSCA21	100,70	100,10	7916,71	195,30
TSCA22	100,90	100,40	7956,18	191,20
TSCA23A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TSCA23B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TSCA24A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TSCA24B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TSCA30	100,30	101,25	7975,95	198,50
TSCA31	99,85	99,80	7826,29	197,80
TSCA32	100,50	99,50	7853,75	196,75
TSCA33	99,00	99,00	7697,46	198,10
TSCA34	101,10	100,70	7995,75	195,95
TSCA35	100,75	99,70	7889,13	193,50
TSCA36A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TSCA36B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TSCA37A	100,00	100,00	7853,75	50,00
TSCA37B	100,00	100,00	7853,75	50,00
TSCA43A	99,25	100,55	7838,05	49,50
TSCA43B	101,20	99,45	7904,88	49,38
TSCA44A	99,70	100,35	7857,68	49,68
TSCA44B	99,80	100,50	7877,33	49,85
TSCA45	100,00	100,58	7899,37	197,48
TSCA46	99,45	99,78	7793,39	192,04
TSCA47	100,92	99,86	7915,13	196,37
TSCA48	100,51	100,03	7896,22	195,75
TSCA49	100,01	99,20	7791,83	194,35
TSCA50	99,76	99,66	7808,26	193,34
TCV1	100,00	99,10	7783,23	195,20
TCV2	99,40	99,90	7798,87	195,10
TCV3	99,20	99,20	7728,59	194,40
TCV4	100,40	100,10	7893,07	196,70
TCV5	99,30	99,80	7783,23	195,80

TABELA 29 – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA

CP	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Seção transversal (mm²)	(Conclusão)	
				Comprimento (mm)	
TCV6	99,10	100,00	7783,23	192,40	
TCV7A	100,00	100,00	7853,75	50,00	
TCV7B	100,00	100,00	7853,75	50,00	
TCV8A	100,00	100,00	7853,75	50,00	
TCV8B	100,00	100,00	7853,75	50,00	
TCV9	100,80	100,50	7956,18	188,30	
TCV10	100,20	99,70	7845,90	187,70	
TCV11	100,80	98,70	7814,53	190,00	
TCV12	100,30	100,80	7940,38	177,90	
TCV13	100,00	100,40	7885,20	187,50	
TCV14	99,30	99,60	7767,60	185,90	
TCV15A	100,00	100,00	7853,75	50,00	
TCV15B	100,00	100,00	7853,75	50,00	
TCV16A	100,00	100,00	7853,75	50,00	
TCV16B	100,00	100,00	7853,75	50,00	
TCV17	100,40	99,40	7838,05	190,30	
TCV18	99,00	101,00	7853,75	194,80	
TCV19	99,60	99,40	7775,41	187,70	
TCV20	99,70	101,00	7908,82	191,00	
TCV21	99,50	100,70	7869,47	190,50	
TCV22	99,30	100,40	7830,21	190,10	
TCV43A	100,75	99,90	7904,88	49,65	
TCV43B	99,70	99,85	7818,45	49,80	
TCV44A	100,15	101,10	7952,23	49,28	
TCV44B	101,15	101,20	8039,40	49,33	
TCV45	98,80	99,33	7707,57	195,37	
TCV46	98,44	99,16	7666,39	197,73	
TCV47	99,55	100,19	7833,34	194,71	
TCV48	99,36	99,73	7782,44	195,81	
TCV49	99,93	99,66	7821,58	194,75	
TCV50	101,07	100,86	8006,06	191,22	

FONTE: O autor (2023).

APÊNDICE 2 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

QUADRO 4 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ELIMINAÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS

(continua)

Amostra	CP Pressão (MPa)		Tratamento estatístico de dados			
			Critério de Chauvenet			Critério Sd < 4; Co V < 7
			$r = x_i - \text{méd} /Sd$	$r_{\text{crítico}}$	Status	Novo conjunto de dados
TR 7 dias	TR1	75	0,923	1,645	ok	75
	TR2	81	0,608		ok	81
	TR3	76	0,689		ok	76
	TR4	73 média = 77,4	-		-	- nova média = 78,4
	TR5	84 Sd = 4,0	1,451		ok	84 novo Sd = 3,6
	TR6	77 Co.V = 5,2	0,445		ok	77 novo Co.V = 4,6
TR* 28 dias	TR9	69	0,021	1,645	ok	69
	TR10	73	1,182		ok	73
	TR11	66	0,686		ok	66
	TR12	71 média = 67,7	0,741		ok	71 nova média = 68,6*
	TR13	64 Sd = 4,0	1,258		ok	64 novo Sd = 3,6
	TR14	63 Co.V = 5,9	-		-	- novo Co.V = 5,2
TRb* 28 dias	TRb1	66	0,883	1,534	ok	66
	TRb2	67	0,565		ok	67
	TRb3	69	0,072		ok	69
	TRb4	73 média = 68,6	1,376		ok	73 nova média = 68,6*
		Sd = 3,0 Co.V = 4,4				novo Sd = 3,0 novo Co.V = 4,4
TR 56 dias	TR17	-	-	N.A.	-	-
	TR18	44	-		-	-
	TR19	34	-		-	-
	TR20	30 média = 48,3	-		-	- nova média = 66,2
	TR21	68 Sd = 17,1	-		-	68 novo Sd = 1,9
	TR22	65 Co.V = 35,5	-		-	65 novo Co.V = 2,9
TRb 56 dias	TRb5	67	-	N.A.	-	67
	TRb6	82	-		-	-
	TRb7	82	-		-	-
	TRb8	70 média = 75,2	-		-	70 nova média = 68,3
		Sd = 8,0 Co.V = 10,6				novo Sd = 1,8 novo Co.V = 2,6

QUADRO 4 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ELIMINAÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS

(Continuação)

Amostra	CP	Pressão (MPa)	Tratamento estatístico de dados			
			Critério de Chauvenet			Critério $S_d < 4$; $Co V < 7$
			$r = x_i - \text{méd} /S_d$	$r_{\text{crítico}}$	Status	Novo conjunto de dados
TR 91 dias	TR30	83	-	1,645	-	-
	TR31	90	0,027		ok	90
	TR32	87	0,898		ok	87
	TR33	86 média = 88,6	1,037		ok	86 nova média = 89,9
	TR34	92 $S_d = 4,4$	0,670		ok	92 novo $S_d = 3,6$
	TR35	95 $Co.V = 5,0$	1,292		ok	95 novo $Co.V = 4,0$
TR 154 dias	TR45	-	-	N.A.	-	-
	TR46	71	-		-	71
	TR47	65	-		-	-
	TR48	74 média = 69,5	-		-	74 nova média = 72,8
	TR49	67 $S_d = 4,0$	-		-	- novo $S_d = 1,8$
		$Co.V = 5,7$				novo $Co.V = 2,4$
TM 7 dias	TM1	46	-	N.A.	-	-
	TM2	45	-		-	-
	TM3	33	-		-	-
	TM4	32 média = 45,8	-		-	- nova média = 59,6
	TM5	60 $S_d = 12,3$	-		-	60 novo $S_d = 0,7$
	TM6	59 $Co.V = 26,8$	-		-	59 novo $Co.V = 1,1$
TM 28 dias	TM9	79	0,957	1,645	ok	79
	TM10	77	0,318		ok	77
	TM11	73	-		-	-
	TM12	68 média = 75,2	-		-	- nova média = 77,6
	TM13	77 $S_d = 4,0$	0,308		ok	77 novo $S_d = 0,8$
	TM14	77 $Co.V = 5,3$	0,114		ok	77 novo $Co.V = 1,1$
TMb 28 dias	TMb1	87	0,965	1,534	ok	87
	TMb2	85	0,002		ok	85
	TMb3	86	0,411		ok	86
	TMb4	81 média = 84,6	1,378		ok	81 nova média = 84,6
		$S_d = 2,3$				novo $S_d = 2,3$
		$Co.V = 2,7$				novo $Co.V = 2,7$

QUADRO 4 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ELIMINAÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS

(Continuação)

Amostra	CP Pressão (MPa)		Tratamento estatístico de dados			
			Critério de Chauvenet			Critério Sd < 4; Co V <7
			$r = x_i - \text{méd} /Sd$	$r_{\text{crítico}}$	Status	Novo conjunto de dados
TMb 56 dias	TMb5	76	0,702	1,534	ok	76
	TMb6	76	0,727		ok	76
	TMb7	72	1,406		ok	72
	TMb8	74	0,023		ok	74
		média = 74,3 Sd = 1,8 Co.V = 2,4				nova média = 74,3 novo Sd = 1,8 novo Co.V = 2,4
TM 56 dias	TM17	38	-	1,383	-	-
	TM18	50	0,118		ok	50
	TM19	-	-		-	-
	TM20	44	18,660		-	-
	TM21	52	0,936		ok	52
	TM22	47	1,054		ok	47
TM 91 dias	TM30	81	0,542	1,383	ok	81
	TM31	68	-		-	-
	TM32	72	-		-	-
	TM33	81	0,612		ok	81
	TM34	77	1,154		ok	77
	TM35	72	-		-	-
TM 154 dias	TM45	70	0,896	1,534	ok	70
	TM46	64	-		-	-
	TM47	70	0,830		ok	70
	TM48	66	0,766		ok	66
	TM49	65	0,960		ok	65
	TM50	51	-		-	-
TF 7 dias	TF1	40	1,326	1,732	ok	40
	TF2	44	0,227		ok	44
	TF3	46	0,938		ok	46
	TF4	42	0,632		ok	42
	TF5	47	1,290		ok	47
	TF6	43	0,498		ok	43

QUADRO 4 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ELIMINAÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS

(Continuação)

Amostra	CP Pressão (MPa)		Tratamento estatístico de dados			
			Critério de Chauvenet			Critério Sd < 4; Co V <7
			$r = x_i - \text{méd} /Sd$	$r_{\text{crítico}}$	Status	Novo conjunto de dados
TF 28 dias	TF9	50	0,324	1,534	ok	50
	TF10	52	1,268		ok	52
	TF11	48	0,694		ok	48
	TF12	48 média = 46,0	0,898		ok	48 nova média = 49,7
	TF13	40 Sd = 6,0	-		-	- novo Sd = 2,1
	TF14	37 Co.V = 13,1	-		-	- novo Co.V = 4,3
TF 56 dias	TF17	58	1,466	1,534	ok	58
	TF18	54	-		-	-
	TF19	62	0,198		ok	62
	TF20	63 média = 58,7	0,697		ok	63 nova média = 61,3
	TF21	63 Sd = 4,5	0,571		ok	63 novo Sd = 2,5
	TF22	53 Co.V = 7,6	-		-	- novo Co.V = 4,0
TF 91 dias	TF30	67	0,944	1,732	ok	67
	TF31	61	0,589		ok	61
	TF32	67	1,057		ok	67
	TF33	57 média = 63,1	1,604		ok	57 nova média = 63,1
	TF34	63 Sd = 4,0	0,068		ok	63 novo Sd = 4,0
	TF35	64 Co.V = 6,3	0,260		ok	64 novo Co.V = 6,3
TF 154 dias	TF45	54	-	1,383	-	-
	TF46	55	-		-	-
	TF47	61	1,133		ok	61
	TF48	65 média = 59,8	0,760		ok	65 nova média = 63,4
	TF49	64 Sd = 5,2	0,373		ok	64 novo Sd = 2,3
	-	- Co.V = 8,7	-		-	- novo Co.V = 3,6
TSCA 7 dias	TSCA1	65	0,409	1,383	ok	65
	TSCA2	66	0,731		ok	66
	TSCA3	51	-		-	-
	TSCA4	58 média = 58,6	-		-	- nova média = 63,3
	TSCA5	59 Sd = 6,1	1,140		ok	59 novo Sd = 3,6
	TSCA6	52 Co.V = 10,5	-		-	- novo Co.V = 5,7

QUADRO 4 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ELIMINAÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS

(Continuação)

Amostra	CP	Pressão (MPa)	Tratamento estatístico de dados			
			Critério de Chauvenet			Critério Sd < 4; Co V < 7
			$r = x_i - \text{méd} /S_d$	$r_{\text{crítico}}$	Status	Novo conjunto de dados
TSCA 28 dias	TSCA9	77	1,012	1,383	ok	77
	TSCA10	56	-		-	-
	TSCA11	73	0,024		ok	73
	TSCA12	54 média = 63,9	-		-	- nova média = 73,2
	TSCA13	53 Sd = 10,5	-		-	- novo Sd = 3,7
	TSCA14	70 Co.V = 16,4	0,988		ok	70 novo Co.V = 5,0
TSCA 56 dias	TSCA17	87	0,421	1,732	ok	87
	TSCA18	84	1,325		ok	84
	TSCA19	89	0,320		ok	89
	TSCA20	94 média = 88,4	1,704		ok	94 nova média = 88,4
	TSCA21	88 Sd = 3,3	0,040		ok	88 novo Sd = 3,3
	TSCA22	88 Co.V = 3,8	0,239		ok	88 novo Co.V = 3,8
TSCA 91 dias	TSCA30	95	0,963	1,645	ok	95
	TSCA31	95	1,211		ok	95
	TSCA32	89	0,836		ok	89
	TSCA33	90 média = 88,4	0,600		ok	90 nova média = 91,8
	TSCA34	90 Sd = 8,7	0,738		ok	90 novo Sd = 3,1
	TSCA35	71 Co.V = 9,9	-		-	- novo Co.V = 3,3
TSCA 154 dias	TSCA45	63	1,084	1,534	ok	63
	TSCA46	52	-		-	-
	TSCA47	69	0,012		ok	69
	TSCA48	57 média = 63,8	-		-	- nova média = 68,6
	TSCA49	67 Sd = 8,5	0,255		ok	67 novo Sd = 5,1
	-	- Co.V = 13,3	1,327		ok	75 novo Co.V = 7,4
TCV 7 dias	TCV1	42	0,920	1,534	ok	42
	TCV2	41	0,787		ok	41
	TCV3	50	-		-	-
	TCV4	32 média = 40,4	-		-	- nova média = 40,3
	TCV5	39 Sd = 5,7	1,048		ok	39 novo Sd = 1,5
	TCV6	39 Co.V = 14,0	0,659		ok	39 novo Co.V = 3,7

QUADRO 4 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ELIMINAÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS

(Conclusão)

Amostra	CP Pressão (MPa)		Tratamento estatístico de dados			
			Critério de Chauvenet			Critério Sd < 4; Co V < 7
			$r = x_i - \text{méd} /Sd$	$r_{\text{crítico}}$	Status	Novo conjunto de dados
TCV 28 dias	TCV9	62	0,257	1,732	ok	62
	TCV10	65	1,264		ok	65
	TCV11	62	0,333		ok	62
	TCV12	62 média = 60,6	0,297		ok	62 nova média = 60,6
	TCV13	54 Sd = 3,8	1,717		ok	54 novo Sd = 3,8
	TCV14	59 Co.V = 6,2	0,435		ok	59 novo Co.V = 6,2
TCV 56 dias	TCV17	68	0,408	1,732	ok	68
	TCV18	67	0,726		ok	67
	TCV19	67	0,858		ok	67
	TCV20	71 média = 69,9	0,406		ok	71 nova média = 69,9
	TCV21	77 Sd = 3,9	1,829		-	77 novo Sd = 3,9
	TCV22	69 Co.V = 5,6	0,242		ok	69 novo Co.V = 5,6
TCV 154 dias	TCV45	86	0,707	N.A.	ok	86
	TCV46	83	0,707		ok	83
	TCV47	58	-		-	-
	TCV48	71 média = 71,9	-		-	- nova média = 84,6
	TCV49	61 Sd = 11,3	-		-	- novo Sd = 2,1
	TCV50	72 Co.V = 15,7	-		-	- novo Co.V = 2,5

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 5 – ANOVA RC: CASO TR E TRB

Tempo de cura	28 dias	28 dias b	56 dias	56 dias b	
RC (MPa)	68,7	66,0		67,0	
	72,9	66,9			
	66,2	68,9			
Amostras	71,3	72,8		69,6	
TR e TRb	64,2		67,5		
			64,8		
Totais	343,19	274,54	132,33	136,62	T..= 886,67
n	5	4	2	2	N = 13
Médias	68,64	68,63	66,16	68,311	Y = 68,21
TC = T..2 / N				60476,24	
SQT = $\sum(Y_{ij}^2) - TC$				94,92	
SQG = $\sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$				10,04	
SQR = SQT – SQG				84,88	
Fonte	Soma dos quadrados	GDL	Médias quadradas	Teste F	Ftab
Entre Grupos (Tempo de cura)	10,0	3	3,3	0,4*	3,86
Dentro Grupos (Residual)	84,9	9	9,4		
Total	94,9	12			

NOTA – F < Ftab, indica que não há distinção estatística entre grupos, com 95 % de confiabilidade.

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 6 –LIMITE DE DECISÃO: RC NO CASO TR E TRB

$S_x = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	1,70
$L.D = 3 \times S_x$	5,11

FONTE: O autor (2023).

TABELA 30 – TESTE DE TUKEY RC: CASO TR E TRB

Amostras TR	56 dias	56 dias b	28 dias b	28 dias
	66,2	68,3	68,6	68,6
Diferenças entre grupos	2,15	0,29	0,04	
	< L.D	2,44	2,48	
		< L.D	<L.D	

FONTE: O autor (2023).

Observa-se na Tabela 30, que não há distinção estatística entre nenhum dos grupos apresentados. Isso permite que os resultados de TR28 e TRb28 podem ser analisados no mesmo grupo, o mesmo vale para TR56 e TRb56.

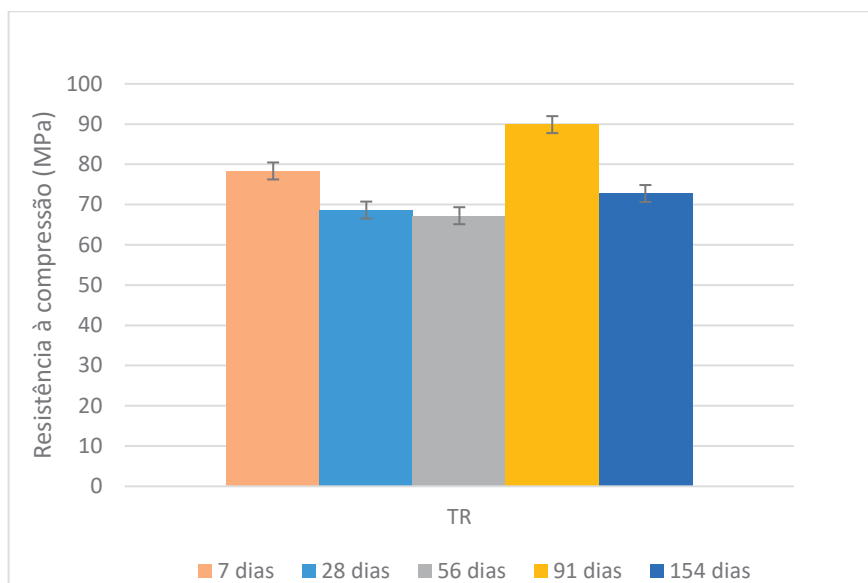
QUADRO 7 – ANOVA TR: RC X TEMPO DE CURA (1)

Tempo de cura	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias	154 dias		
	75,0	68,7					
	80,6	72,9		89,8	71,5		
	75,8	66,2		86,6			
		71,3		86,1	74,0		
RC (MPa)	83,6	64,2	67,5	92,3			
Amostras TR	76,7		64,8	94,5			
		66,0	67,0				
		66,9					
		68,9					
		72,8	69,6				
Totais	391,79	617,73	268,95	449,33	145,50	T _{..} =	1873,30
n	5	9	4	5	2	N =	25
Médias	78,36	68,64	67,24	89,87	72,75	Y _{..} =	74,93
TC = T _{..} ² / N							140369,91
SQT = $\sum(Y_{ij}^2) - TC$							1974,30
SQG = $\sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$							1776,81
SQR = SQT – SQG							197,49
Fonte	Soma dos quadrados		GDL	Médias quadradas	Teste F	F _{tab}	
Entre Grupos (Tempo de cura)	1776,8		4	444,2	45,0	2,87	
Dentro Grupos (Residual)	197,5		20	9,9			
Total	1974,3		24				

NOTA – F > F_{tab}, indica distinção estatística entre grupos, com 95 % de confiabilidade.

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 64 – GRÁFICO DE FATORES TR: RC X TEMPO DE CURA (1)



FONTE: O autor (2023).

Observa-se no gráfico de fatores, que há prováveis inconsistências nos resultados de TR 7 e TR91.

QUADRO 8 –LIMITE DE DECISÃO TR: RC X TEMPO DE CURA (1)

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	1,41
$L.D = 3 \times S_x$	4,22

FONTE: O autor (2023).

TABELA 31 – TESTE DE TUKEY TR: RC X TEMPO DE CURA (1)

Amostras TR	56 dias	28 dias	154 dias	7 dias	91 dias
	67,24	68,64	72,75	78,36	89,87
Diferenças entre grupos		1,40	4,11	5,61	11,51
		< Ld	< Ld		

FONTE: O autor (2023).

O teste de tukey confirma que os valores de RC obtidos aos sete dias e aos 91 dias são incoerentes. Esses resultados são dados espúrios.

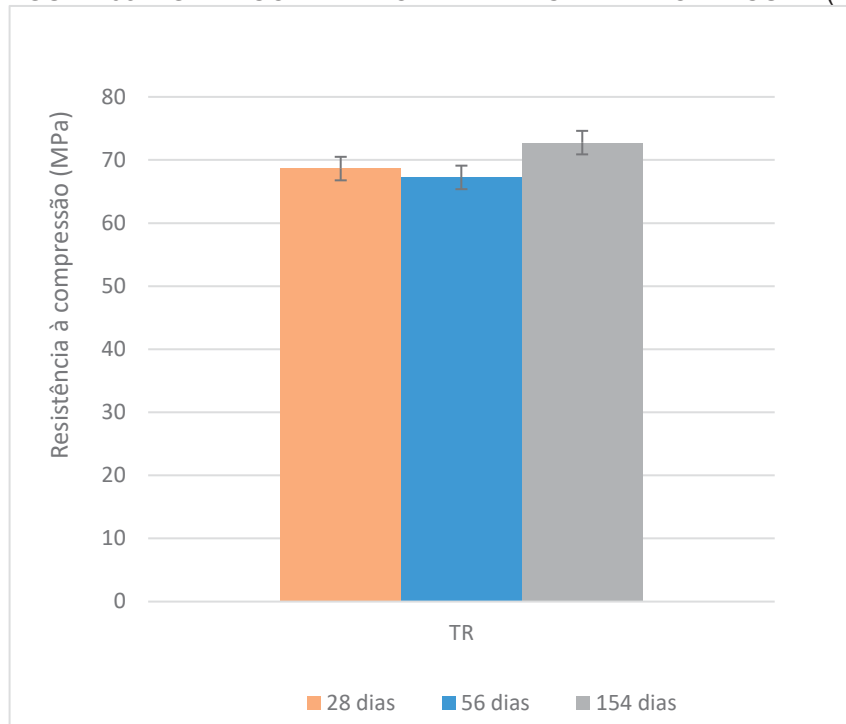
QUADRO 9 – ANOVA TR: RC X TEMPO DE CURA (2)

Tempo de cura	28 dias	56 dias	154 dias		
RC (MPa) Amostras TR	68,7				
	72,9		71,5		
	66,2				
	71,3		74,0		
	64,2	67,5			
		64,8			
	66,0	67,0			
	66,9				
	68,9				
	72,8	69,6			
Totais	617,73	268,95	145,50	$T_{..} =$	1032,18
n	9	4	2	$N =$	15
Médias	68,64	67,24	72,75	$Y_{..} =$	68,81
$TC = T_{..}^2 / N$					71026,15
$SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$					133,91
$SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$					41,26
$SQR = SQT - SQG$					92,66
Fonte	Soma dos quadrados	GDL	Médias quadradas	Teste F	F _{tab}
Entre Grupos (Tempo de cura)	41,3	2	20,6	2,7	3,89
Dentro Grupos (Residual)	92,7	12	7,7		92,7
Total	133,9	14			133,9

NOTA – $F < F_{tab}$, indica que não há distinção estatística entre grupos, com 95 % de confiabilidade.

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 65 – GRÁFICO DE FATORES TR: RC X TEMPO DE CURA (2)



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 10 – LIMITE DE DECISÃO TR: RC X TEMPO DE CURA (2)

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{n_c}$	1,24
$L.D = 3 \times S_x$	3,73

FONTE: O autor (2023).

TABELA 32 – TESTE DE TUKEY: RC X TEMPO DE CURA (2)

Amostras TR	56 dias	28 dias	154 dias
	67,24	68,62	72,75
Diferenças entre grupos		1,38	4,13
		< Ld	

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 11 – ANOVA RC: CASO TM E TMB

Tempo de cura	28 dias	28 dias b	56 dias	56 dias b	
	78,8	86,8		75,5	
RC (MPa)	77,4	84,6	50,2	75,6	
		85,5		71,8	
Amostras		81,5		74,2	
TM e TMB	77,3		52,4		
	76,9		47,1		
Totais	310,39	338,45	149,75	297,13	T..= 1095,72
n	4	4	3	4	N = 15
Médias	77,60	84,61	49,92	74,28	Y = 73,05
TC = T.. ² / N					80039,78
SQT = $\sum(Y_{ij})^2 - TC$					2270,31
SQG = $\sum(T_{.j})^2 / n_j - TC$					2229,22
SQR = SQT – SQG					41,09
Fonte	Soma dos quadrados	GDL	Médias quadradas	Teste F	F _{tab}
Entre Grupos (Tempo de cura)	2229,2	3	743,1	198,9	3,59
Dentro Grupos (Residual)	41,1	11	3,7		
Total	2270,3	14			

NOTA – $F > F_{tab}$, indica que estatística entre grupos, com 95 % de confiabilidade.

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 12 – LIMITE DE DECISÃO: RC NO CASO TM E TMB

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{n_c}$	1,00
$L.D = 3 \times S_x$	2,99

FONTE: O autor (2023).

TABELA 33 – TESTE DE TUKEY RC: CASO TM E TMB

Amostras TM	56 dias	56 dias b	28 dias b	28 dias
	50,2	74,3	77,6	84,6
Diferenças entre grupos	24,08	3,31	6,97	

FONTE: O autor (2023).

Observa-se na Tabela 33, que há distinção estatística entre todos os grupos. Assim, os resultados das amostras TM56 e TM28b serão excluídos como dados espúrios para realização das próximas análises.

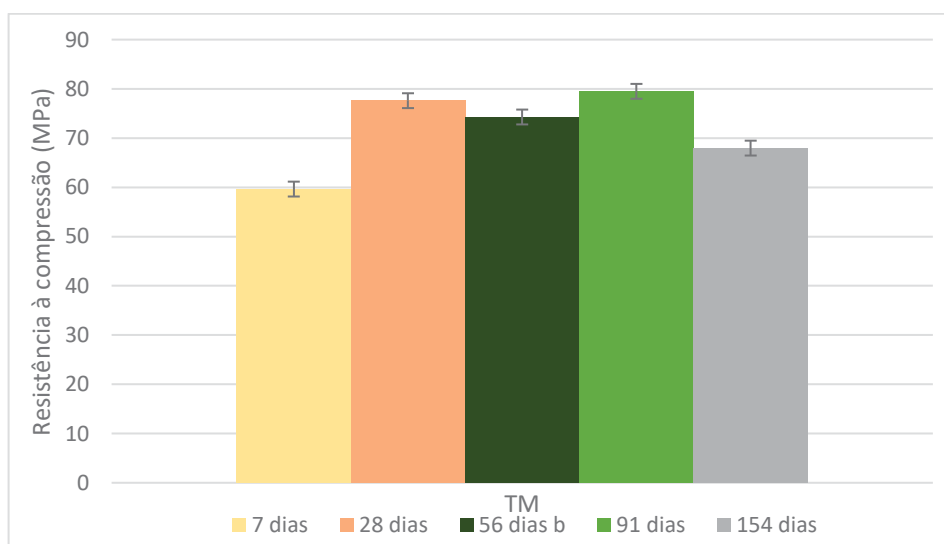
QUADRO 13 – ANOVA TM: RC X TEMPO DE CURA (1)

Tempo de cura	7 dias	28 dias	56 dias b	91 dias	154 dias		
RC (MPa) Amostras TM		78,8	75,5	80,6	70,4		
		77,4	75,6				
			71,8		70,2		
			74,2	80,7	65,9		
	60,1	77,3		77,2	65,4		
	59,2	76,9					
Totais	119,29	310,39	297,13	238,49	271,86	$T_{..} =$	1237,15
n	2	4	4	3	4	$N =$	17
Médias	59,64	77,60	74,28	79,50	67,97	$Y_{..} =$	72,77
TC = $T_{..}^2 / N$							90032,22
SQT = $\sum(Y_{ij}^2) - TC$							716,33
SQG = $\sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$							675,00
SQR = SQT – SQG							41,33
Fonte	Soma dos quadrados		GDL	Médias quadradas	Teste F	Ftab	
Entre Grupos (Tempo de cura)	675,0		4	168,7	49,0	3,26	
Dentro Grupos (Residual)	41,3		12	3,4			
Total	716,3		16				

NOTA – $F > F_{tab}$, indica distinção estatística entre grupos, com 95 % de confiabilidade.

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 66 – GRÁFICO DE FATORES TM: RC X TEMPO DE CURA (1)



FONTE: O autor (2023).

Observa-se no gráfico de fatores, que há prováveis inconsistências nos resultados de TM56b e TM154.

QUADRO 14 – LIMITE DE DECISÃO TM: RC X TEMPO DE CURA (1)

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	1,01
$L.D = 3 \times S_x$	3,02

FONTE: O autor (2023).

TABELA 34 – TESTE DE TUKEY TM: RC X TEMPO DE CURA (1)

Amostras TM	7 dias	154 dias	56 dias b	28 dias	91 dias
	59,6	68,0	74,3	77,6	79,5
Diferenças entre grupos		8,32	6,32	3,32	1,90
					< Ld

FONTE: O autor (2023).

O teste de tukey confirma que os valores de RC obtidos aos 56 dias e aos 154 dias são inferiores aos obtidos aos 28 dias e aos 91 dias. Esses resultados são dados espúrios.

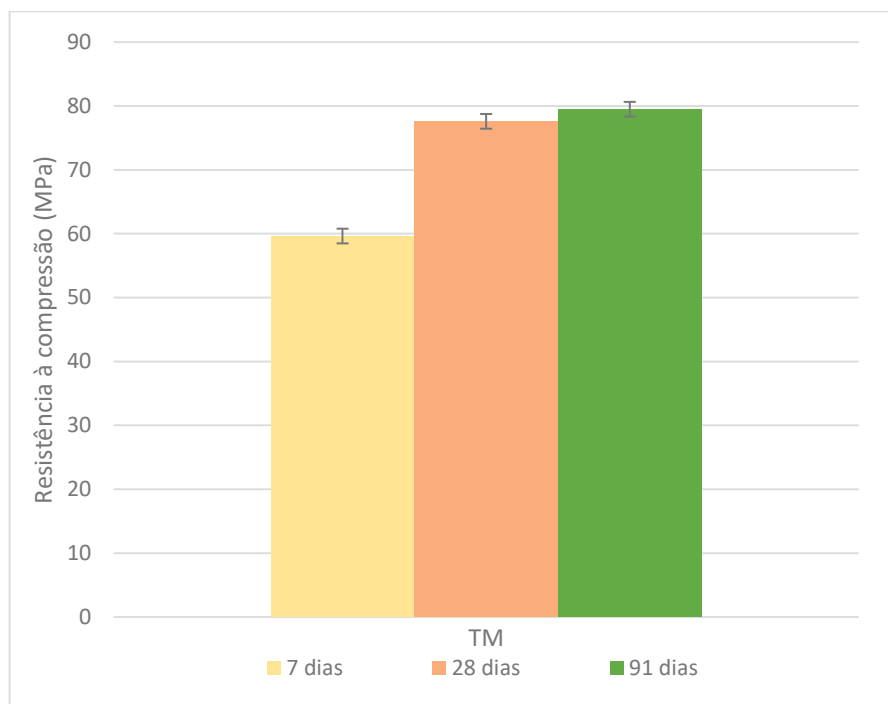
QUADRO 15 – ANOVA TM: RC X TEMPO DE CURA (2)

Tempo de cura	7 dias	28 dias	91 dias		
RC (MPa) Amostras TM		78,8	80,6		
		77,4			
			80,7		
	60,1	77,3	77,2		
	59,2	76,9			
Totais	119,29	310,39	238,49	$T_{..} =$	668,16
n	2	4	3	$N =$	9
Médias	59,64	77,60	79,50	$Y_{..} =$	74,24
$TC = T_{..}^2 / N$					49604,22
$SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$					564,67
$SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$					554,07
$SQR = SQT - SQG$					10,61
Fonte	Soma dos quadrados	GDL	Médias quadradas	Teste F	Ftab
Entre Grupos (Tempo de cura)	554,1	2	277,0	156,7	5,14
Dentro Grupos (Residual)	10,6	6	1,8		
Total	564,7	8			

NOTA – $F > F_{tab}$, indica distinção estatística entre grupos, com 95 % de confiabilidade.

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 67 – GRÁFICO DE FATORES TM: RC X TEMPO DE CURA (2)



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 16 – LIMITE DE DECISÃO TM: RC X TEMPO DE CURA (2)

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{n_c}$	0,77
$L.D = 3 \times S_x$	2,30

FONTE: O autor (2023).

TABELA 35 – TESTE DE TUKEY: RC X TEMPO DE CURA (2)

Amostras Tm	7 dias	28 dias	91 dias
	59,6	77,6	79,5
Diferenças entre grupos		17,96	1,90
			< Ld

FONTE: O autor (2023).

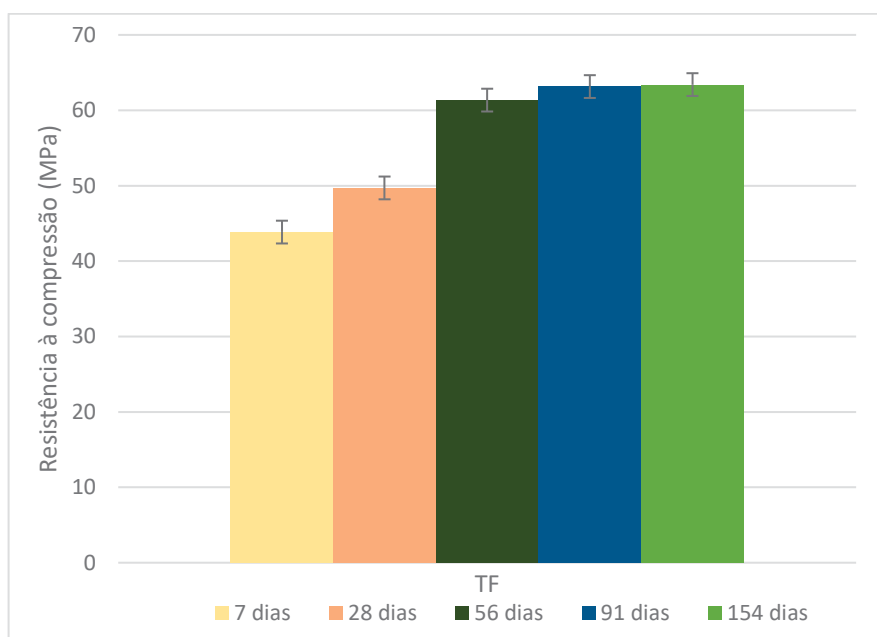
QUADRO 17 – ANOVA TF: RC X TEMPO DE CURA

Tempo de cura	7 dias	28 dias	56 dias b	91 dias	154 dias		
RC (MPa) Amostras TF	40,5	50,4	57,8	66,9			
	44,4	52,4		60,8			
	46,2	48,2	61,8	67,3	60,8		
	42,2	47,8	63,1	56,8	65,2		
	47,1		62,8	62,9	64,3		
	42,6			64,2			
Totais	263,09	198,81	245,40	378,89	190,23	$T_{..} =$	1276,42
n	6	4	4	6	3	$N =$	23
Médias	43,85	49,70	61,35	63,15	63,41	$Y_{..} =$	55,50
TC = $T_{..}^2 / N$							70837,20
SQT = $\sum(Y_{ij}^2) - TC$							1777,81
SQG = $\sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$							1624,43
SQR = SQT – SQG							153,38
Fonte	Soma dos quadrados		GDL	Médias quadradas	Teste F	Ftab	
Entre Grupos (Tempo de cura)	1624,4		4	406,1	47,7	2,93	
Dentro Grupos (Residual)	153,4		18	8,5			
Total	1777,8		22				

NOTA – $F > F_{tab}$, indica distinção estatística entre grupos, com 95 % de confiabilidade.

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 68 – GRÁFICO DE FATORES TF: RC X TEMPO DE CURA



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 18 – LIMITE DE DECISÃO TF: RC X TEMPO DE CURA

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{n_c}$	1,36
$L.D = 3 \times S_x$	4,08

FONTE: O autor (2023).

TABELA 36 – TESTE DE TUKEY TF: RC X TEMPO DE CURA

Amostras TF	7 dias	28 dias	56 dias	154 dias	91 dias
	43,8	49,8	61,7	63,4	63,7
Diferenças entre grupos		5,92	11,95	1,68	0,27
				< Ld	1,96
					< Ld

FONTE: O autor (2023).

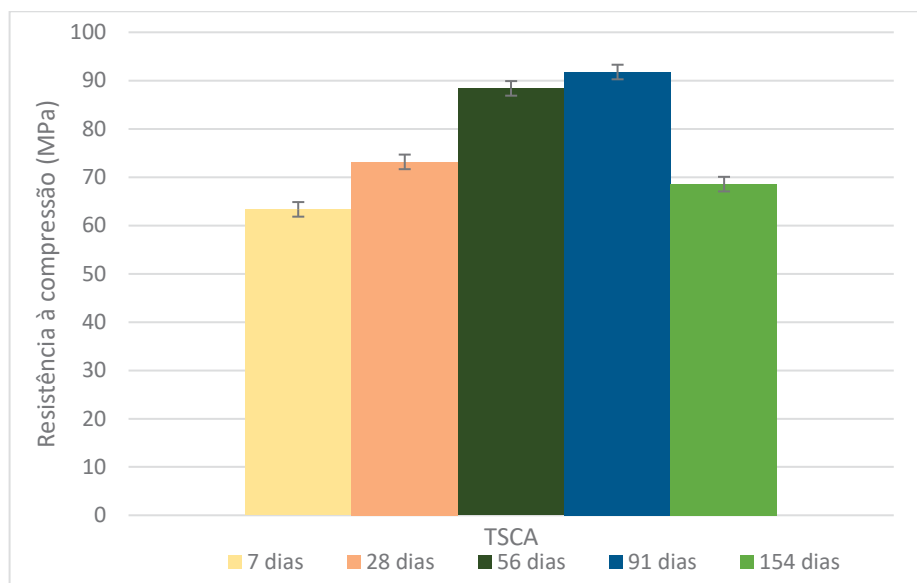
QUADRO 19 – ANOVA TSCA: RC X TEMPO DE CURA (1)

Tempo de cura	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias	154 dias		
RC (MPa) Amostras TSCA	64,8	76,9	87,0	94,7	63,1		
	66,0		84,0	95,5			
		73,1	89,5	89,2	68,6		
			94,1	89,9			
	59,2		88,3	89,5	67,3		
		69,6	87,6		75,3		
Totais	190,02	219,51	530,32	458,88	274,27	$T_{..} =$	1673,00
n	3	3	6	5	4	$N =$	21
Médias	63,34	73,17	88,39	91,78	68,57	$Y_{..} =$	79,67
$TC = T_{..}^2 / N$							133282,02
$SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$							2832,55
$SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$							2608,69
$SQR = SQT - SQG$							223,86
Fonte	Soma dos quadrados		GDL	Médias quadradas	Teste F	Ftab	
Entre Grupos (Tempo de cura)	2608,7		4	652,2	46,6	3,01	
Dentro Grupos (Residual)	223,9		16	14,0			
Total	2832,6		20				

NOTA – $F > F_{tab}$, indica distinção estatística entre grupos, com 95 % de confiabilidade.

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 69 – GRÁFICO DE FATORES TSCA: RC X TEMPO DE CURA (1)



FONTE: O autor (2023).

O gráfico da Figura 69 mostra que, aparentemente o resultado obtido aos 154 dias é incoerente.

QUADRO 20 – LIMITE DE DECISÃO TSCA: RC X TEMPO DE CURA (1)

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{n_c}$	1,83
$L.D = 3 \times S_x$	5,48

FONTE: O autor (2023).

TABELA 37 – TESTE DE TUKEY TSCA: RC X TEMPO DE CURA (A)

Amostras TSCA	7 dias	154 dias	28 dias	56 dias	91 dias
	63,4	68,6	73,5	88,8	91,8
Diferenças entre grupos		5,1	5,0	15,3	3,0
		< Ld	< Ld		< Ld

FONTE: O autor (2023).

O teste de Tukey, na Tabela 37, confirma a inconsistência do resultado obtido aos 154 dias. Em uma nova análise os dados da amostra TSCA154 serão descartados por serem dados espúrios.

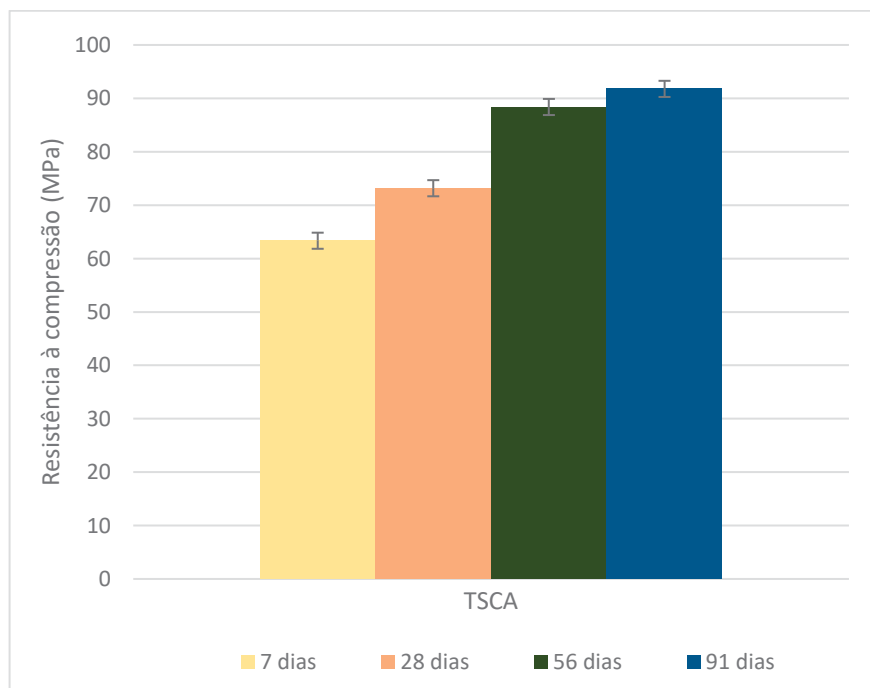
QUADRO 21 – ANOVA TSCA: RC X TEMPO DE CURA

Tempo de cura	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias		
RC (MPa) Amostras TSCA	64,8	76,9	87,0	94,7		
	66,0		84,0	95,5		
		73,1	89,5	89,2		
			94,1	89,9		
	59,2		88,3	89,5		
		69,6	87,6			
Totais	190,02	219,51	530,32	458,88	T _{..} =	1398,73
n	3	3	6	5	N =	17
Médias	63,34	73,17	88,39	91,78	Y _{..} =	82,28
TC = T _{..} ² / N						115085,31
SQT = $\sum (Y_{ij})^2 - TC$						2146,59
SQG = $\sum (T_{.j})^2 / n_j - TC$						1999,89
SQR = SQT – SQG						146,70
Fonte	Soma dos quadrados		GDL	Médias quadradas	Teste F	F _{tab}
Entre Grupos (Tempo de cura)	1999,9		3	666,6	59,1	3,41
Dentro Grupos (Residual)	146,7		13	11,3		
Total	2146,6		16			

NOTA – F > F_{tab}, indica distinção estatística entre grupos, com 95 % de confiabilidade.

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 70 – GRÁFICO DE FATORES TSCA: RC X TEMPO DE CURA



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 22 – LIMITE DE DECISÃO TSCA: RC X TEMPO DE CURA

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{n_c}$	1,63
$L.D = 3 \times S_x$	4,89

FONTE: O autor (2023).

TABELA 38 – TESTE DE TUKEY TSCA: RC X TEMPO DE CURA

Amostras TSCA	7 dias	28 dias	56 dias	91 dias
	63,4	73,5	88,8	91,8
Diferenças entre grupos	10,1	15,3	3,0	
			< Ld	

FONTE: O autor (2023).

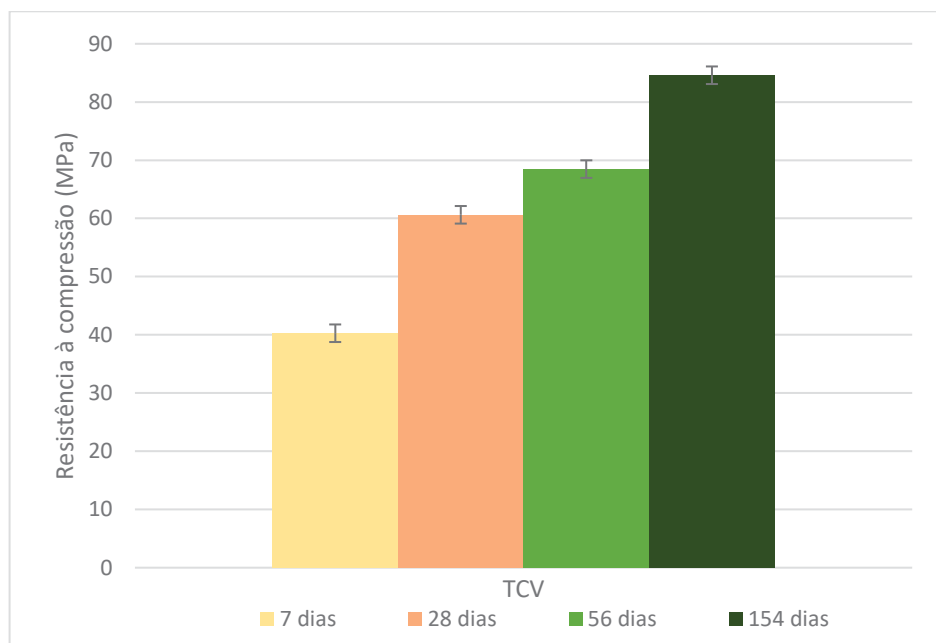
QUADRO 23 – ANOVA TCV: RC X TEMPO DE CURA

Tempo de cura	7 dias	28 dias	56 dias	154 dias		
RC (MPa) Amostras TCV	41,7	61,6	68,3	86,1		
	41,5	65,4	67,1	83,1		
		61,9	66,5			
		61,7	71,5			
	38,7	54,1				
	39,3	59,0	69,0			
Totais	161,09	363,72	342,35	169,19	$T_{..} =$	1036,34
n	4	6	5	2	$N =$	17
Médias	40,27	60,62	68,47	84,59	$Y_{..} =$	60,96
$TC = T_{..}^2 / N$						63176,96
$SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$						3209,80
$SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$						3111,66
$SQR = SQT - SQG$						98,15
Fonte	Soma dos quadrados	GDL	Médias quadradas	Teste F	Ftab	
Entre Grupos (Tempo de cura)	3111,7	3	1037,2	137,4	3,41	
Dentro Grupos (Residual)	98,1	13	7,5			
Total	3209,8	16				

NOTA – $F > F_{tab}$, indica distinção estatística entre grupos, com 95 % de confiabilidade.

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 71 – GRÁFICO DE FATORES TCV: RC X TEMPO DE CURA



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 24 – LIMITE DE DECISÃO TCV: RC X TEMPO DE CURA

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{n_c}$	1,33
$L.D = 3 \times S_x$	4,00

FONTE: O autor (2023).

TABELA 39 – TESTE DE TUKEY TSCA: RC X TEMPO DE CURA

Amostras TCV	7 dias	28 dias	56 dias	154 dias
	40,3	61,3	68,9	84,6
Diferenças entre grupos	21,0	7,6	15,7	

FONTE: O autor (2023).

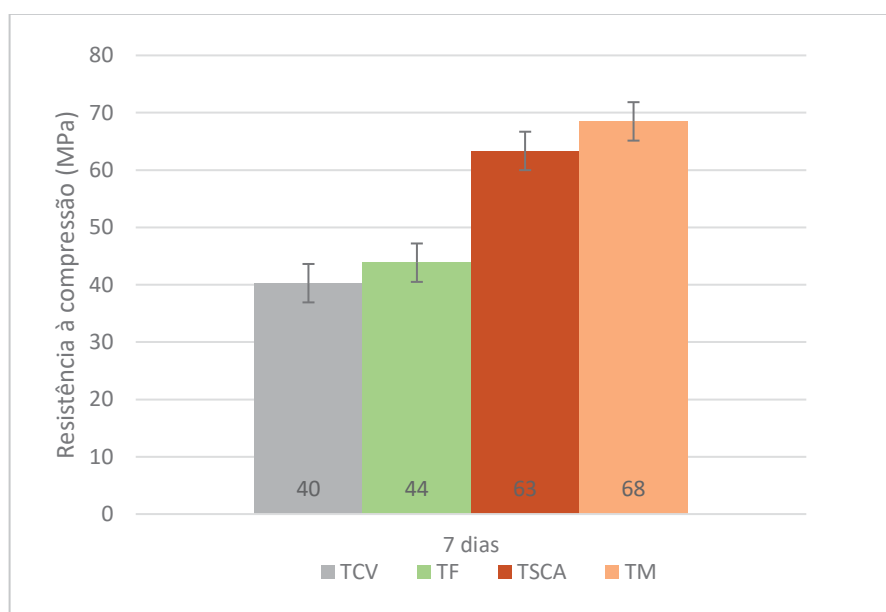
QUADRO 25 – ANOVA 7 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

Traço	TM	TF	TSCA	TCV		
RC (MPa) 7 dias	-	40,5	64,8	41,7		
	-	44,4	66,0	41,5		
	-	46,2	-	-		
	-	42,2	-	-		
	60,1	47,1	59,2	38,7		
	76,9	42,6	-	39,3		
Totais	136,99	263,09	190,02	161,09	T.. ₂ =	751,19
n	2	6	3	4	N =	15
Médias	68,49	43,85	63,34	40,27	Y.. ₂ =	50,08
TC = T.. ₂ / N						37618,84
SQT = $\sum(Y_{ij}^2) - TC$						2029,20
SQG = $\sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$						1823,19
SQR = SQT – SQG						206,01
Fonte		Soma dos quadrados	GDL	Médias quadradas	Teste F	Ftab
Entre Grupos (Tempo de cura)		1823,2	3	607,7	32,4	3,59
Dentro Grupos (Residual)		206,0	11	18,7		
Total		2029,2	14			

NOTA – $F > F_{tab}$, indica distinção estatística entre grupos, com 95 % de confiabilidade.

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 72 – GRÁFICO DE FATORES 7 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 26 – LIMITE DE DECISÃO 7 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{n_c}$	2,23
$L.D = 3 \times S_x$	6,70

FONTE: O autor (2023).

TABELA 40 – TESTE DE TUKEY 7 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

Amostras 7 dias	TCV	TF	TSCA	TM
	40	44	63	68
Diferenças entre grupos	3,6	19,5	5,2	
	< L.D		< L.D	

FONTE: O autor (2023).

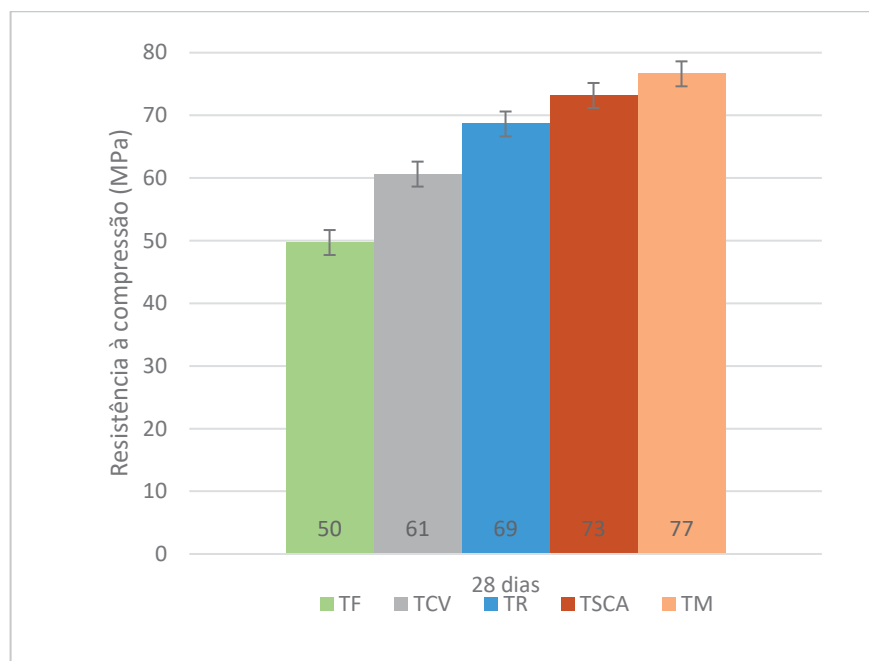
QUADRO 27 – ANOVA 28 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

Traço	TR	TM	TF	TSCA	TCV		
RC (MPa) 28 dias	TR	TM	TF	TSCA	TCV		
	68,7	78,8	50,4	76,9	61,6		
	72,9	77,4	52,4	-	65,4		
	66,2	-	48,2	73,1	61,9		
	71,3	-	47,8	-	61,7		
	64,2	77,3	-	-	54,1		
Totais	617,73	310,39	198,81	219,51	363,72	T _{..} =	1710,16
n	9	4	4	3	6	N =	26
Médias	68,64	77,60	49,70	73,17	60,62	Y _{..} =	65,78
TC = T _{..} ² / N							112486,34
SQT = ∑(Y _{ij} ²) – TC							2181,81
SQG = ∑(T _{.j} ² / n _j) – TC							1989,57
SQR = SQT – SQG							192,24
Fonte		Soma dos quadrados	GDL	Médias quadradas	Teste F	F _{tab}	
Entre Grupos (Tempo de cura)		1989,6	4	497,4	54,3	2,84	
Dentro Grupos (Residual)		192,2	21	9,2			
Total		2181,8	25				

NOTA – $F > F_{tab}$, indica distinção estatística entre grupos, com 95 % de confiabilidade.

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 73 – GRÁFICO DE FATORES 28 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 28 – LIMITE DE DECISÃO 28 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

$S_x = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	1,33
$L.D = 3 \times S_x$	3,98

FONTE: O autor (2023).

TABELA 41 – TESTE DE TUKEY 28 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

Amostras TSCA	TF	TCV	TR	TSCA	TM
	50	61	69	73	77
Diferenças entre grupos		10,9	8,0	4,5	3,5
					< Ld

FONTE: O autor (2023).

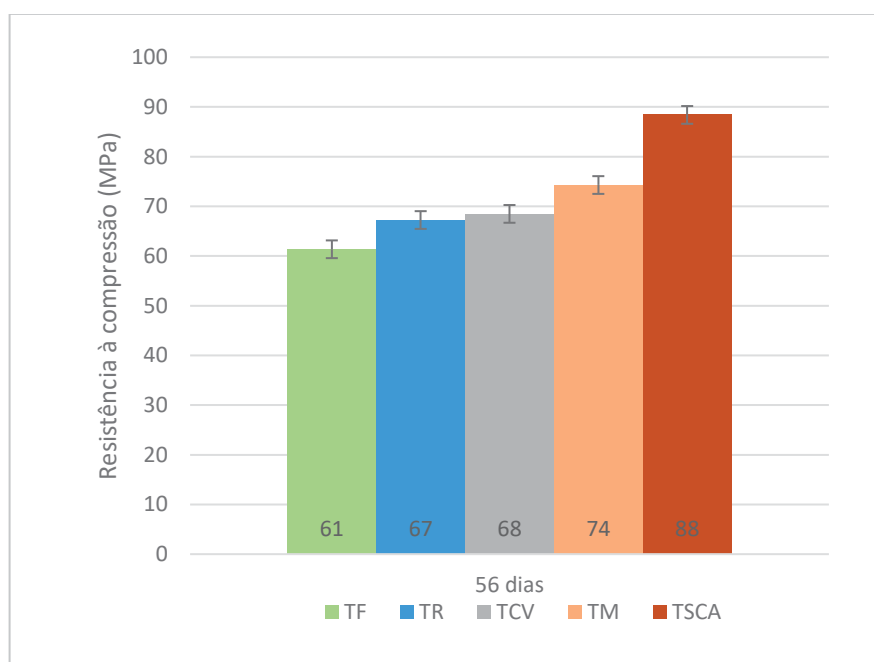
QUADRO 29 – ANOVA 56 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DO CONCRETO

Traço	TR	TF	TSCA	TCV		
RC (MPa) 56 dias	67,5	57,8	87,0	68,3		
	64,8	-	84,0	67,1		
	67,0	61,8	89,5	66,5		
	-	63,1	94,1	71,5		
	-	62,8	88,3	-		
	69,6	-	87,6	69,0		
Totais	268,95	245,40	530,32	342,35	$T_{..} =$	1387,02
n	4	4	6	5	$N =$	19
Médias	67,24	61,35	88,39	68,47	$Y_{..} =$	73,00
$TC = T_{..}^2 / N$						101253,65
$SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$						2299,79
$SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$						2199,04
$SQR = SQT - SQG$						100,75
Fonte	Soma dos quadrados	GDL	Médias quadradas	Teste F	Ftab	
Entre Grupos (Tempo de cura)	2199,0	3	733,0	109,1	3,29	
Dentro Grupos (Residual)	100,7	15	6,7			
Total	2299,8	18				

NOTA – $F > F_{tab}$, indica distinção estatística entre grupos, com 95 % de confiabilidade.

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 74 – GRÁFICO DE FATORES 56 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 30 – LIMITE DE DECISÃO 56 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{n_c}$	1,19
$L.D = 3 \times S_x$	3,57

FONTE: O autor (2023).

TABELA 42 – TESTE DE TUKEY 56 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

Amostras 56 dias	TF	TR	TCV	TM
	61	67	68	74
Diferenças entre grupos	5,9	1,2	5,8	
		< L.D		

FONTE: O autor (2023).

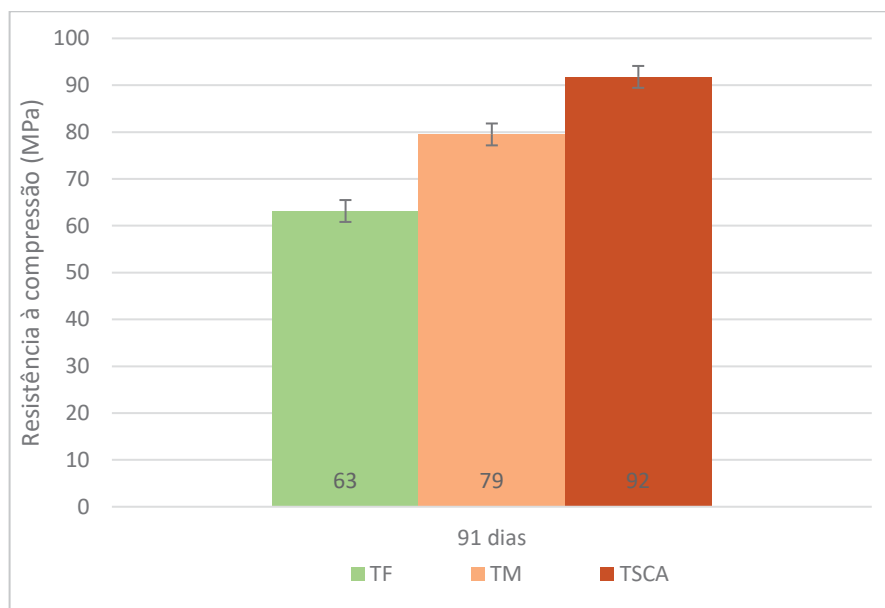
QUADRO 31 – ANOVA 91 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DO CONCRETO

Tempo de cura	7 dias	28 dias	91 dias		
RC (MPa) 91 dias	80,6	66,9	94,7		
	-	60,8	95,5		
	-	67,3	89,2		
	80,7	56,8	89,9		
	77,2	62,9	89,5		
	-	64,2	-		
Totais	238,49	378,89	458,88	$T_{..} =$	1076,26
n	3	6	5	$N =$	14
Médias	79,50	63,15	91,78	$Y_{..} =$	76,88
$TC = T_{..}^2 / N$					82737,64
$SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$					2385,76
$SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$					2261,20
$SQR = SQT - SQG$					124,56
Fonte	Soma dos quadrados	GDL	Médias quadradas	Teste F	Ftab
Entre Grupos (Tempo de cura)	2261,2	2	1.130,6	99,8	3,98
Dentro Grupos (Residual)	124,6	11	11,3		
Total	2385,8	13			

NOTA – $F > F_{tab}$, indica distinção estatística entre grupos, com 95 % de confiabilidade.

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 75 – GRÁFICO DE FATORES 91 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 32 – LIMITE DE DECISÃO TM: RC X TEMPO DE CURA (A)

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	1,56
$L.D = 3 \times S_x$	4,67

FONTE: O autor (2023).

TABELA 43 – TESTE DE TUKEY 56 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

Amostras Tm	TF	TM	TSCA
	63	79	92
Diferenças entre grupos	16,3	12,3	

FONTE: O autor (2023).

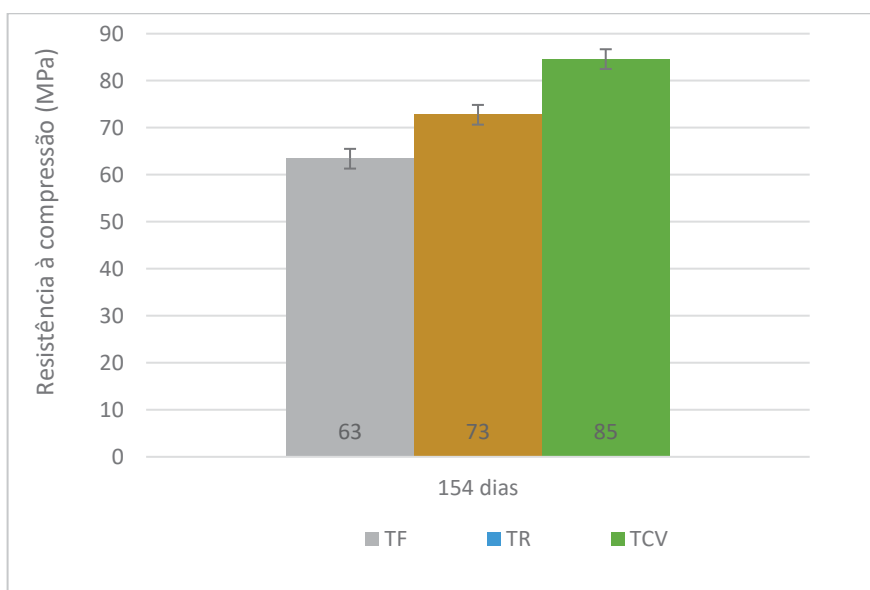
QUADRO 33 – ANOVA 154 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DO CONCRETO

Tempo de cura	7 dias	28 dias	91 dias		
RC (MPa) 91 dias	-	-	86,1		
	71,5	-	83,1		
	-	60,8	-		
	74,0	65,2	-		
	-	64,3	-		
	-	-	-		
Totais	145,50	190,23	169,19	$T_{..} =$	504,92
n	2	3	2	$N =$	7
Médias	72,75	63,41	84,59	$Y_{..} =$	72,13
$TC = T_{..}^2 / N$					36420,13
$SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$					557,93
$SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$					539,65
$SQR = SQT - SQG$					18,29
Fonte	Soma dos quadrados	GDL	Médias quadradas	Teste F	Ftab
Entre Grupos (Tempo de cura)	539,6	2	269,8	59,0	6,94
Dentro Grupos (Residual)	18,3	4	4,6		
Total	557,9	6			

NOTA – $F > F_{tab}$, indica distinção estatística entre grupos, com 95 % de confiabilidade.

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 76 -GRÁFICO DE FATORES 154 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 34 – LIMITE DE DECISÃO TM: RC X TEMPO DE CURA (A)

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	1,40
$L.D = 3 \times S_x$	4,20

FONTE: O autor (2023).

TABELA 44 – TESTE DE TUKEY 154 DIAS: RC X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

Amostras Tm	TF	TR	TCV
	63	73	85
Diferenças entre grupos	9,3	11,8	

FONTE: O autor (2023).

TABELA 45 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tempo de cura \ Traço	TR	TM	TF	TSCA	TCV
7	-	60	44	63	40
28	69	78	50	73	61
56	67	-	61	88	68
91	-	79	63	92	-
154	73	-	63	-	85

FONTE – O autor (2023).

APÊNDICE 3 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL

QUADRO 35 – LEITURAS DE RES POR CP

(Continua)

Amostra \ CP	TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
TR 7 dias	14,6	13,7	15,0	15,4	12,8	14,2
	14,4	14,5	14,2	14,7	13,2	14,3
	14,7	13,7	13,7	14,2	12,7	14,1
	13,6	14,2	14,0	14,9	12,4	13,4
	14,5	14,2	14,1	14,1	13,2	12,0
	14,4	13,4	14,8	14,5	13,1	14,1
Média do CP (kΩcm)	14,4	14,0	14,3	14,6	12,9	13,7
Sd	0,4	0,4	0,5	0,5	0,3	0,9
Co.V	3%	3%	4%	3%	2%	6%
TR 28 dias	TR9	TR10	TR11	TR12	TR13	TR14
	22,7	22,6	24,1	22,9	24,4	24,3
	24,4	22,0	22,7	23,4	22,1	23,6
	24,0	22,4	23,7	26,1	23,9	25,0
	24,1	22,5	26,8	22,8	23,2	24,2
	25,1	21,9	24,2	23,3	23,9	23,0
Média do CP (kΩcm)	24,1	22,4	24,5	25,9	24,7	23,8
	24,1	22,3	24,3	24,1	23,7	24,0
	0,8	0,3	1,4	1,5	0,9	0,7
	3%	1%	6%	6%	4%	3%
TR 56 dias	TR17	TR18	TR19	TR20	TR21	TR22
	26,3	26,8	27,4	26,1	28,1	26,2
	25,7	27,4	26,2	26,1	29,0	27,1
	25,9	27,4	27,8	27,4	27,1	26,3
	28,3	26,3	27,7	28,1	27,7	27,4
	28,3	26,1	27,2	30,7	28,2	26,3
Média do CP (kΩcm)	27,4	25,0	28,5	28,2	27,6	24,3
	27,0	26,5	27,5	27,8	28,0	26,3
	1,2	0,9	0,8	1,7	0,6	1,1
	4%	3%	3%	6%	2%	4%

QUADRO 35 – LEITURAS DE RES POR CP

(Continuação)

Amostra \ CP	TR30	TR31	TR32	TR33	TR34	TR35
TR 91 dias	33,0	32,6	34,8	30,6	32,0	35,5
	32,8	31,2	34,1	31,8	30,1	33,6
	36,4	33,0	32,4	32,4	30,1	33,0
	32,7	32,2	34,5	33,4	30,2	34,1
	30,7	30,6	33,6	31,8	31,4	32,5
	36,6	31,8	32,7	30,4	30,4	34,5
Média do CP (kΩcm)	33,7	31,9	33,7	31,7	30,7	33,9
Sd	2,3	0,9	1,0	1,1	0,8	1,1
Co.V	7%	3%	3%	4%	3%	3%
TR 154 dias	TR45	TR46	TR47	TR48	TR49	
	37,0	38,8	38,8	37,6	33,4	
	35,3	35,8	34,1	40,8	34,7	
	34,4	45,0	36,6	38,4	35,3	
	36,3	40,8	37,1	37,7	36,6	
	36,4	40,6	39,7	38,4	36,2	
Média do CP (kΩcm)	38,2	37,4	36,1	39,3	32,4	
	36,3	39,7	37,1	38,7	34,8	
	1,3	3,2	2,0	1,2	1,6	
	4%	8%	5%	3%	5%	
TM 7 dias	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
	26,1	26,9	26,5	29,3	25,7	26,0
	28,6	27,2	27,0	28,1	27,6	27,5
	25,4	26,1	26,0	28,0	27,4	27,9
	26,7	27,2	26,7	27,0	28,9	26,6
	27,9	25,9	26,9	27,5	26,7	27,0
Média do CP (kΩcm)	26,4	27,8	25,1	26,8	24,5	26,4
	26,9	26,9	26,4	27,8	26,8	26,9
	1,2	0,7	0,7	0,9	1,5	0,7
	4%	3%	3%	3%	6%	3%
Co.V	4%	3%	3%	3%	6%	3%

QUADRO 35 – LEITURAS DE RES POR CP

(Continuação)

Amostra \ CP	TM9	TM10	TM11	TM12	TM13	TM14
TM 28 dias	60,3	65,2	55,2	66,2	60,1	63,0
	60,7	65,7	46,1	66,6	61,8	65,5
	60,0	61,7	48,1	66,3	59,2	63,6
	61,8	63,4	55,5	66,2	60,7	63,4
	59,9	65,3	52,4	67,5	63,0	60,6
	67,2	61,5	58,9	64,1	59,2	59,5
Média do CP (kΩcm)	61,7	63,8	52,7	66,2	60,7	62,6
Sd	2,8	1,9	4,8	1,1	1,5	2,2
Co.V	5%	3%	9%	2%	2%	3%
	TM17	TM18	TM19	TM20	TM21	TM22
TM 56 dias	108	79,1	95,1	94,7	107	84,3
	108	83,8	98,0	96,4	100	81,8
	98,9	83,8	100	96,7	103	76,0
	89,7	92,1	92,4	92,5	102	78,6
	109	87,1	93,9	94,9	100	84,9
	109	83,5	96,7	96,8	94,6	80,2
Média do CP (kΩcm)	103,6	84,9	96,0	95,3	101,1	81,0
Sd	7,8	4,4	2,8	1,7	4,1	3,4
Co.V	8%	5%	3%	2%	4%	4%
	TM30	TM31	TM32	TM33	TM34	TM35
TM 91 dias	85,3	90,6	79,5	77,9	77,1	80,8
	80,1	82,4	80,0	76,3	80,2	76,5
	78,5	78,9	77,7	72,3	74,5	81,3
	86,5	82,4	70,2	75,0	78,7	84,3
	82,6	89,8	76,6	79,1	75,9	83,2
	82,4	84,7	76,5	78,9	78,6	77,2
Média do CP (kΩcm)	82,6	84,8	76,8	76,6	77,5	80,6
Sd	3,0	4,6	3,5	2,6	2,1	3,1
Co.V	4%	5%	5%	3%	3%	4%

QUADRO 35 – LEITURAS DE RES POR CP

(Continuação)

Amostra \ CP	TM45	TM46	TM47	TM48	TM49	TM50
TM 154 dias	69,6	62,7	79,7	70,3	67,1	69,6
	69,8	73,3	81,5	70,7	69,7	64,7
	66,9	70,8	85,7	71,0	73,1	62,9
	70,1	67,3	86,7	74,4	74,0	70,7
	72,6	77,2	83,9	72,6	70,2	74,9
	79,9	67,9	80,1	73,6	71,7	69,4
Média do CP (kΩcm)	71,5	69,9	82,9	72,1	71,0	68,7
Sd	4,5	5,1	2,9	1,7	2,5	4,3
Co.V	6%	7%	4%	2%	4%	6%
TF 7 dias	TF1	TF2	TF3	TF4	TF5	TF6
	11,8	11,6	11,9	11,9	10,8	12,4
	11,8	11,3	12,1	11,5	11,0	11,3
	11,5	10,2	11,6	11,5	10,5	11,5
	12,3	11,8	12,4	11,3	10,4	12,0
	11,9	11,4	11,6	11,4	10,6	12,1
Média do CP (kΩcm)	11,0	10,8	11,0	12,3	11,0	11,5
	11,7	11,2	11,8	11,7	10,7	11,8
	0,4	0,6	0,5	0,4	0,3	0,4
	4%	5%	4%	3%	2%	4%
TF 28 dias	TF9	TF10	TF11	TF12	TF13	TF14
	16,6	18,8	16,6	16,6	14,8	16,6
	15,0	16,6	16,6	16,1	15,2	16,8
	15,9	17,4	16,6	16,8	15,2	15,3
	16,3	18,2	15,4	17,6	14,9	15,8
	16,3	16,5	17,9	16,8	16,0	15,1
Média do CP (kΩcm)	15,0	18,7	16,9	16,5	15,6	16,3
	15,9	17,7	16,7	16,7	15,3	16,0
	0,7	1,0	0,8	0,5	0,4	0,7
	4%	6%	5%	3%	3%	4%

QUADRO 35 – LEITURAS DE RES POR CP

(Continuação)

Amostra \ CP	TF17	TF18	TF19	TF20	TF21	TF22
TF 56 dias	19,9	19,2	20,9	19,5	21,2	19,7
	19,9	18,2	21,7	19,4	21,2	19,3
	18,9	18,3	21,5	21,0	20,2	22,1
	19,9	18,7	21,7	19,4	19,7	21,5
	17,9	18,3	21,0	21,1	20,7	21,2
	19,4	18,9	23,2	18,8	18,7	21,0
Média do CP (kΩcm)	19,3	18,6	21,7	19,9	20,3	20,8
Sd	0,8	0,4	0,8	1,0	1,0	1,1
Co.V	4%	2%	4%	5%	5%	5%
TF 91 dias	TF30	TF31	TF32	TF33	TF34	TF35
	17,8	17,7	19,2	19,7	18,6	18,9
	18,4	18,3	18,3	19,3	19,0	18,0
	18,0	17,7	18,7	17,2	18,6	18,3
	19,1	18,0	18,0	18,8	18,3	20,1
	17,5	18,4	18,2	19,4	19,2	18,3
Média do CP (kΩcm)	18,1	18,3	17,9	18,7	18,7	17,4
	18,1	18,1	18,4	18,9	18,7	18,5
	0,6	0,3	0,5	0,9	0,3	0,9
	3%	2%	3%	5%	2%	5%
TF 154 dias	TF45	TF46	TF47	TF48	TF49	
	21,0	20,0	21,0	21,0	21,9	
	20,4	21,6	22,2	19,8	21,5	
	20,1	18,5	22,3	19,9	21,1	
	19,0	20,0	20,5	22,3	23,2	
	19,8	20,5	21,2	21,0	22,4	
Média do CP (kΩcm)	20,8	19,7	21,8	22,0	22,3	
	20,2	20,1	21,5	21,0	22,1	
	0,7	1,0	0,7	1,0	0,7	
	4%	5%	3%	5%	3%	

QUADRO 35 – LEITURAS DE RES POR CP

(Continuação)

Amostra \ CP	TSCA1	TSCA2	TSCA3	TSCA4	TSCA5	TSCA6
TSCA 7 dias	15,8	16,3	15,4	15,2	15,5	15,4
	15,3	16,5	15,1	15,4	16,1	16,1
	16,9	16,7	15,1	16	15,7	15,5
	14,5	15,5	15,5	16,5	15	15,3
	15	14,9	16,2	15,4	16,8	15,8
	15,5	15	15,9	14,3	15,2	14,7
Média do CP (kΩcm)	15,5	15,8	15,5	15,5	15,7	15,5
Sd	0,8	0,8	0,4	0,7	0,7	0,5
Co.V	5%	5%	3%	5%	4%	3%
	TSCA9	TSCA10	TSCA11	TSCA12	TSCA13	TSCA14
TSCA 28 dias	32,2	28,5	33,4	35,6	32,2	32,0
	31,0	28,8	31,1	35,2	30,4	29,4
	31,8	27,9	30,4	33,8	33,0	32,2
	30,8	28,6	31,4	31,9	32,0	31,4
	33,6	28,5	32,7	33,2	30,3	30,2
	31,1	28,3	31,8	36,7	33,6	31,3
Média do CP (kΩcm)	31,8	28,4	31,8	34,4	31,9	31,1
Sd	1,1	0,3	1,1	1,8	1,3	1,1
Co.V	3%	1%	3%	5%	4%	3%
	TSCA17	TSCA18	TSCA19	TSCA20	TSCA21	TSCA22
TSCA 56 dias	51,8	53,1	52,2	50,8	50,6	54,0
	47,5	50,9	52,2	48,2	48,1	52,5
	48,4	54,5	49,3	53,2	44,1	51,0
	53,4	55,4	49,9	52,2	46,1	54,3
	53,8	53,7	52,7	51,5	51,4	54,4
	54,4	58,1	56,2	51,8	51,8	54,1
Média do CP (kΩcm)	51,6	54,3	52,1	51,3	48,7	53,4
Sd	2,9	2,4	2,4	1,7	3,1	1,4
Co.V	6%	4%	5%	3%	6%	3%

QUADRO 35 – LEITURAS DE RES POR CP

(Continuação)

Amostra \ CP	TSCA30	TSCA31	TSCA32	TSCA33	TSCA34	TSCA35
TSCA 91 dias	91,8	86,1	85,2	96,3	89,5	90,3
	87,1	86,6	76,5	98,0	80,4	92,9
	97,6	91,0	89,2	97,5	89,5	93,6
	95,0	90,5	86,6	89,6	82,5	98,7
	85,5	86,6	87,8	93,3	85,2	99,0
	86,0	90,4	86,0	101	84,1	95,1
Média do CP (kΩcm)	90,5	88,5	85,2	96,0	85,2	94,9
Sd	5,1	2,3	4,5	4,1	3,7	3,4
Co.V	6%	3%	5%	4%	4%	4%
	TSCA45	TSCA46	TSCA47	TSCA48	TSCA49	TSCA50
TSCA 154 dias	128	144	142	123	124	133
	126	143	139	124	128	133
	130	133	137	120	128	124
	128	131	142	126	133	119
	121	137	136	121	137	131
	125	138	140	120	133	134
Média do CP (kΩcm)	126,5	137,5	139,4	122,3	130,5	128,9
Sd	3,4	5,2	2,3	2,4	4,7	6,4
Co.V	3%	4%	2%	2%	4%	5%
	TCV1	TCV2	TCV3	TCV4	TCV5	TCV6
TCV 7 dias	12,9	11,7	10,8	11,0	10,6	10,5
	11,1	12,3	11,1	11,3	10,5	11,1
	11,4	11,8	10,8	12,0	11,5	11,5
	12,1	12,1	11,4	10,2	12,0	12,0
	10,5	12,1	13,0	10,7	11,1	11,7
	11,7	10,6	12,0	11,2	10,4	11,4
Média do CP (kΩcm)	11,6	11,8	11,5	11,1	11,0	11,4
Sd	0,8	0,6	0,8	0,6	0,6	0,5
Co.V	7%	5%	7%	5%	6%	5%

QUADRO 35 – LEITURAS DE RES POR CP

(Conclusão)

Amostra \ CP	TCV9	TCV10	TCV11	TCV12	TCV13	TCV14
TCV 28 dias	20,1	20,6	20,1	20,8	21,5	19,3
	18,6	20,8	19,7	20,5	20,2	21,5
	20,9	21,2	18,5	20,5	20,8	19,4
	20,0	20,5	19,4	20,5	20,0	20,3
	18,9	19,5	20,0	20,8	20,0	20,0
	20,4	19,7	21,1	20,1	21,1	20,4
Média do CP (kΩcm)	19,8	20,4	19,8	20,5	20,6	20,2
Sd	0,9	0,7	0,9	0,3	0,6	0,8
Co.V	4%	3%	4%	1%	3%	4%
TCV 56 dias	TCV17	TCV18	TCV19	TCV20	TCV21	TCV22
	45,1	43,0	45,1	43,9	41,7	46,1
	41,9	44,2	44,6	42,3	45,7	44,8
	44,9	42,7	42,6	41,8	45,2	44,1
	43,5	48,3	40,4	42,3	43,2	42,4
	42,1	40,2	42,5	41,5	46,7	40,5
Média do CP (kΩcm)	42,5	42,1	43,0	41,5	45,3	43,5
	43,3	43,4	43,0	42,2	44,6	43,6
	1,4	2,7	1,7	0,9	1,8	1,9
	3%	6%	4%	2%	4%	4%
TCV 154 dias	TCV45	TCV46	TCV47	TCV48	TCV49	TCV50
	112	101	105	105	109	106
	111	103	110	103	109	111
	111	102	100	103	112	108
	113	107	106	102	109	114
	111	106	105	105	112	114
Média do CP (kΩcm)	110	108	111	105	114	104
	111,2	104,3	105,9	103,7	110,9	109,5
	1,1	2,9	3,9	1,5	1,9	4,2
	1%	3%	4%	1%	2%	4%

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 36 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DAS LEITURAS DE RES, POR CP

(Continua)

Amostra	CPs – RES e Dispersão (%) / Co.V < 10 % - Critério de Chauvenet: $r < r_{\text{critico}}$											
TR 7 dias	TR1			TR2			TR3			TR4		
	14,6	0,6%		13,7	1,8%		15,0	4,9%		15,4	5,2%	
	14,4	0,8%		14,5	3,9%		14,2	0,7%		14,7	0,5%	
	14,7	1,2%		13,7	1,8%		13,7	4,2%		14,2	3,0%	
	-	-		14,2	1,8%		14,0	2,3%		14,9	1,8%	
	14,5	0,1%		14,2	1,8%		14,1	1,4%		14,1	3,6%	
	14,4	0,8%		13,4	3,9%		14,8	3,5%		14,5	0,9%	
	14,52	$r_{\text{crit}} :$		13,95	$r_{\text{crit}} :$		14,29	$r_{\text{crit}} :$		14,63	$r_{\text{crit}} :$	
	0,13	1,645		0,41	1,732		0,50	1,732		0,48	1,732	
	1%	$r :$		3%	$r :$		4%	$r :$		3%	$r :$	
		1,38			1,33			1,40			1,60	
											1,55	
TR 28 dias	TR9			TR10			TR11			TR12		
	-	-		22,6	1,3%		24,1	1,1%		22,9	4,8%	
	24,4	1,0%		22,0	1,3%		22,7	4,8%		23,4	2,8%	
	24,0	0,6%		22,4	0,4%		23,7	0,6%		26,1	8,4%	
	24,1	0,2%		22,5	0,9%		-	-		22,8	5,3%	
	-	-		21,9	1,8%		24,2	1,5%		23,3	3,2%	
	24,1	0,2%		22,4	0,4%		24,5	2,8%		25,9	7,6%	
	24,15	$r_{\text{crit}} :$		22,30	$r_{\text{crit}} :$		23,84	$r_{\text{crit}} :$		24,07	$r_{\text{crit}} :$	
	0,17	1,534		0,28	1,732		0,70	1,645		1,52	1,732	
	1%	$r :$		1%	$r :$		3%	$r :$		6%	$r :$	
		1,44			1,41			1,63			1,34	
											1,71	
TR 56 dias	TR17			TR18			TR19			TR20		
	26,3	2,5%		26,8	1,1%		27,4	0,2%		26,1	6,0%	
	25,7	4,8%		27,4	3,4%		26,2	4,6%		26,1	6,0%	
	25,9	4,0%		27,4	3,4%		27,8	1,2%		27,4	1,3%	
	28,3	4,9%		26,3	0,8%		27,7	0,8%		28,1	1,2%	
	28,3	4,9%		26,1	1,5%		27,2	1,0%		10,6		
	27,4	1,5%		25	5,7%		28,5	3,8%		28,2	1,6%	
	26,98	$r_{\text{crit}} :$		26,50	$r_{\text{crit}} :$		27,47	$r_{\text{crit}} :$		27,77	$r_{\text{crit}} :$	
	1,18	1,732		0,91	1,732		0,76	1,732		1,71	1,732	
	4%	$r :$		3%	$r :$		3%	$r :$		6%	$r :$	
		1,12			1,64			1,66			1,72	
											1,62	
Nova Média Sd Co.V	TR21			TR22								
	28,1	0,5%		26,2	1,7%							
	29,0	3,8%		27,1	1,7%							
Nova Média Sd Co.V	27,1	3,0%		26,3	1,4%							
	27,7	0,9%		27,4	2,8%							
	28,2	0,9%		26,3	1,4%							
Nova Média Sd Co.V	27,6	1,3%		-	-							
	27,9	5		26,66	$r_{\text{crit}} :$							
	0,65	1,732		0,55	1,645							
Nova Média Sd Co.V	2%	$r :$		2%	$r :$							

Amostra	CPs – RES e Dispersão (%) / Co.V < 10 % - Critério de Chauvenet: $r < r_{\text{crítico}}$
---------	---

Amostra	CPs – RES e Dispersão (%) / Co.V < 10 % - Critério de Chauvenet: $r < r_{critico}$											
	TR30		TR31		TR32		TR33		TR34		TR35	
	33,0	2,1%	32,6	2,2%	34,8	3,3%	30,6	3,6%	32,0	4,2%	35,5	4,8%
	32,8	2,7%	31,2	2,2%	34,1	1,2%	31,8	0,2%	30,1	2,0%	33,6	0,8%
TR	36,4	8,0%	33	3,4%	32,4	3,8%	32,4	2,1%	30,1	2,0%	33,0	2,6%
91 dias	32,7	3,0%	32,2	0,9%	34,5	2,4%	33,4	5,3%	30,2	1,6%	34,1	0,7%
	30,7	8,9%	30,6	4,1%	33,6	0,2%	31,8	0,2%	31,4	2,3%	32,5	4,0%
	36,6	8,6%	31,8	0,3%	32,7	2,9%	30,4	4,2%	30,4	1,0%	34,5	1,9%
Nova Média	33,70	$r_{crit} :$	31,90	$r_{crit} :$	33,68	$r_{crit} :$	31,73	$r_{crit} :$	30,70	$r_{crit} :$	33,87	$r_{crit} :$
Sd	2,32	1,732	0,89	1,732	0,97	1,732	1,12	1,732	0,80	1,732	1,08	1,732
Co.V	7%	$r :$	3%	$r :$	3%	$r :$	4%		3%	$r :$	3%	$r :$
		1,29		1,46		1,32		1,49		1,61		1,51
	TR45		TR46		TR47		TR48		TR49			
	37,0	2,0%	38,8	2,3%	38,8	4,7%	37,6	1,8%	33,4	3,9%	-	-
	35,3	2,7%	35,8	9,9%	34,1	8,0%	-	-	34,7	0,2%	-	-
TR	34,4	5,1%	45	13,3%	36,6	1,3%	38,4	0,3%	35,3	1,5%	-	-
154 dias	36,3	0,1%	40,8	2,7%	37,1	0,1%	37,7	1,5%	36,6	5,3%	-	-
	36,4	0,4%	40,6	2,2%	39,7	7,1%	38,4	0,3%	36,2	4,1%	-	-
	38,2	5,3%	37,4	5,9%	36,1	2,6%	39,3	2,7%	32,4	6,8%	-	-
Nova Média	36,27	$r_{crit} :$	39,73	$r_{crit} :$	37,07	$r_{crit} :$	38,28	$r_{crit} :$	34,77	$r_{crit} :$	-	$r_{crit} :$
Sd	1,32	1,732	3,21	1,732	1,99	1,732	0,68	1,645	1,62	1,732		N.A.
Co.V	4%	$r :$	8%	$r :$	5%	$r :$	2%	$r :$	5%	$r :$	-	$r :$
		1,46		1,64		1,49		1,49		1,46		N.A.
	TM1		TM2		TM3		TM4		TM5		TM6	
	26,1	2,8%	26,9	0,2%	26,5	0,5%	29,3	5,5%	25,7	4,1%	26,0	3,3%
	28,6	6,5%	27,2	1,3%	27,0	1,4%	28,1	1,1%	27,6	3,0%	27,5	2,2%
TM	25,4	5,4%	26,1	2,8%	26,0	2,3%	28,0	0,8%	27,4	2,2%	27,9	3,7%
7 dias	26,7	0,6%	27,2	1,3%	26,7	0,3%	27	2,8%	28,9	7,8%	26,6	1,1%
	27,9	3,9%	25,9	3,5%	26,9	1,1%	27,5	1,0%	26,7	0,4%	27,0	0,4%
	26,4	1,7%	27,8	3,5%	-	-	26,8	3,5%	24,5	8,6%	26,4	1,9%
Nova Média	26,85	$r_{crit} :$	26,85	$r_{crit} :$	26,62	$r_{crit} :$	27,78	$r_{crit} :$	26,80	$r_{crit} :$	26,90	$r_{crit} :$
Sd	1,19	1,732	0,72	1,732	0,40	1,645	0,91	1,732	1,54	1,732	0,71	1,732
Co.V	4%	$r :$	3%	$r :$	1%	$r :$	3%	$r :$	6%	$r :$	3%	$r :$
		1,47		1,31		1,56		1,67		1,49		1,41

QUADRO 36 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DAS LEITURAS DE RES, POR CP

(Continuação)

Amostra	CPs – RES e Dispersão (%) / Co.V < 10 % - Critério de Chauvenet: $r < r_{\text{crítico}}$											
TM 28 dias	TM9		TM10		TM11		TM12		TM13		TM14	
	60,3	0,4%	65,2	2,2%	55,2	4,7%	66,2	0,2%	60,1	0,9%	63,0	0,6%
	60,7	0,3%	65,7	3,0%	46,1	12,5%	66,6	0,4%	61,8	1,9%	65,5	4,6%
	60,0	0,9%	61,7	3,3%	48,1	8,7%	66,3	0,0%	59,2	2,4%	63,6	1,6%
	61,8	2,1%	63,4	0,6%	55,5	5,3%	66,2	0,2%	60,7	0,1%	63,4	1,3%
	59,9	1,1%	65,3	2,4%	52,4	0,6%	-	-	63,0	3,8%	60,6	3,2%
Nova Média Sd Co.V	-	-	61,5	3,6%	58,9	11,8%	-	-	59,2	2,4%	59,5	5,0%
	60,54	$r_{\text{crít}}$:	63,80	$r_{\text{crít}}$:	52,70	$r_{\text{crít}}$:	66,33	$r_{\text{crít}}$:	60,67	$r_{\text{crít}}$:	62,60	$r_{\text{crít}}$:
	0,77	1,645	1,88	1,732	4,84	1,732	0,19	1,534	1,51	1,732	2,18	1,732
	1%	r :	3%	r :	9%	r :	0%	r :	2%	r :	3%	r :
		1,64		1,22		1,36		1,45		1,55		1,42
TM 56 dias	TM17		TM18		TM19		TM20		TM21		TM22	
	108	0,5%	79,1	6,8%	95,1	1,0%	94,7	0,7%	107	5,8%	84,3	4,1%
	108	0,5%	83,8	1,3%	98,0	2,1%	96,4	1,1%	100	1,1%	81,8	1,0%
	-	-	83,8	1,3%	100	4,1%	96,7	1,4%	103	1,5%	76,0	6,1%
	-	-	92,1	8,5%	92,4	3,8%	92,5	3,0%	102	1,2%	78,6	2,9%
	109	0,5%	87,1	2,6%	93,9	2,2%	94,9	0,5%	100	0,9%	84,9	4,9%
Nova Média Sd Co.V	109	0,5%	83,5	1,6%	96,7	0,7%	96,8	1,5%	94,6	6,5%	80,2	0,9%
	108,30	$r_{\text{crít}}$:	84,90	$r_{\text{crít}}$:	96,02	$r_{\text{crít}}$:	95,33	$r_{\text{crít}}$:	101,13	$r_{\text{crít}}$:	80,97	$r_{\text{crít}}$:
	0,58	1,534	4,35	1,732	2,78	1,732	1,66	1,732	4,08	1,732	3,41	1,732
	1%	r :	5%	r :	3%	r :	2%	r :	4%	r :	4%	r :
		0,87		1,65		1,43		1,71		1,60		1,46
TM 91 dias	TM30		TM31		TM32		TM33		TM34		TM35	
	-	-	-	-	79,5	2,5%	77,9	3,3%	77,1	0,8%	80,8	2,3%
	80,1	1,0%	82,4	0,4%	-	-	76,3	1,2%	-	-	76,5	3,1%
	78,5	3,0%	78,9	3,9%	77,7	0,2%	72,3	4,1%	74,5	2,6%	81,3	3,0%
	-	-	82,4	0,4%	-	-	75	0,5%	-	-	-	-
	82,6	2,1%	-	-	76,6	1,3%	-	-	75,9	0,8%	-	-
Nova Média Sd Co.V	82,4	1,9%	84,7	3,2%	76,5	1,4%	-	-	78,6	2,7%	77,2	2,2%
	80,90	$r_{\text{crít}}$:	82,10	$r_{\text{crít}}$:	77,58	$r_{\text{crít}}$:	75,38	$r_{\text{crít}}$:	76,53	$r_{\text{crít}}$:	78,95	$r_{\text{crít}}$:
	1,96	1,534	2,39	1,534	1,39	1,534	2,37	1,534	1,74	1,534	2,45	1,534
	2%	r :	3%	r :	2%	r :	3%	r :	2%	r :	3%	r :
		1,22		1,34		1,38		1,30		1,19		1,00

QUADRO 36 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DAS LEITURAS DE RES, POR CP

(Continuação)

Amostra	CPs – RES e Dispersão (%) / Co.V < 10 % - Critério de Chauvenet: $r < r_{\text{crítico}}$											
TM 154 dias	TM45			TM46			TM47			TM48		
	-	-		-	-		-	-		-	-	
	69,8	4,5%		73,3	1,4%		81,5	3,5%		-	-	
	-	-		70,8	2,1%		85,7	1,5%		71	2,6%	
	70,1	4,1%		-	-		86,7	2,7%		74,4	2,1%	
	72,6	0,7%		77,2	6,8%		83,9	0,7%		72,6	0,4%	
Nova Média Sd Co.V	73,10	$r_{\text{crit}} :$		72,30	$r_{\text{crit}} :$		84,45	$r_{\text{crit}} :$		72,90	$r_{\text{crit}} :$	
	4,70	1,534		3,94	1,534		2,28	1,534		1,47	1,534	
	6%	$r :$		5%	$r :$		3%	$r :$		2%	$r :$	
		1,45			1,24			1,29			1,30	
TF 7 dias	TF1			TF2			TF3			TF4		
	11,8	0,7%		11,6	3,7%		11,9	1,1%		11,9	2,1%	
	11,8	0,7%		11,3	1,0%		12,1	2,8%		11,5	1,3%	
	11,5	1,8%		10,2	8,8%		11,6	1,4%		11,5	1,3%	
	12,3	5,0%		11,8	5,5%		12,4	5,4%		11,3	3,0%	
	11,9	1,6%		11,4	1,9%		11,6	1,4%		11,4	2,1%	
Nova Média Sd Co.V	11,72	$r_{\text{crit}} :$		11,18	$r_{\text{crit}} :$		11,77	$r_{\text{crit}} :$		11,65	$r_{\text{crit}} :$	
	0,44	1,732		0,59	1,732		0,48	1,732		0,38	1,732	
	4%	$r :$		5%	$r :$		4%	$r :$		3%	$r :$	
		1,65			1,67			1,58			1,72	
TF 28 dias	TF9			TF10			TF11			TF12		
	16,6	4,7%		18,8	6,2%		16,6	0,4%		16,6	0,2%	
	15,0	5,4%		16,6	6,2%		16,6	0,4%		16,1	2,8%	
	15,9	0,3%		17,4	1,7%		16,6	0,4%		16,8	1,4%	
	16,3	2,8%		18,2	2,8%		15,4	7,6%		-	-	
	16,3	2,8%		16,5	6,8%		17,9	7,4%		16,8	1,4%	
Nova Média Sd Co.V	15,0	5,4%		18,7	5,6%		16,9	1,4%		16,5	0,4%	
	15,85	$r_{\text{crit}} :$		17,70	$r_{\text{crit}} :$		16,67	$r_{\text{crit}} :$		16,56	$r_{\text{crit}} :$	
	0,69	1,732		1,02	1,732		0,80	1,732		0,29	1,645	
	4%	$r :$		6%	$r :$		5%	$r :$		2%	$r :$	
		1,22			1,18			1,58			1,60	

QUADRO 36 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DAS LEITURAS DE RES, POR CP

(Continuação)

Amostra	CPs – RES e Dispersão (%) / Co.V < 10 % - Critério de Chauvenet: $r < r_{\text{critico}}$											
TF 56 dias	TF17			TF18			TF19			TF20		
	19,9	1,5%		19,2	3,2%		20,9	1,8%		19,5	1,2%	
	19,9	1,5%		18,2	2,2%		-	-		19,4	0,6%	
	18,9	3,6%		18,3	1,6%		21,5	1,1%		-	-	
	19,9	1,5%		18,7	0,5%		21,7	2,0%		19,4	0,6%	
	-	-		18,3	1,6%		21,0	1,3%		-	-	
	19,4	1,0%		18,9	1,6%		-	-		18,8	2,5%	
	19,60	$r_{\text{crit}} :$		18,60	$r_{\text{crit}} :$		21,28	$r_{\text{crit}} :$		19,28	$r_{\text{crit}} :$	
	0,45	1,645		0,40	1,732		0,39	1,534		0,32	1,534	
	2%	$r :$		2%	$r :$		2%	$r :$		2%	$r :$	
TF 91 dias	TF30			TF31			TF32			TF33		
	-	-		-	-		19,2	3,2%		19,7	2,7%	
	18,4	0,2%		18,3	0,3%		18,3	1,6%		19,3	0,6%	
	18,0	2,1%		-	-		18,7	0,5%		-	-	
	19,1	3,9%		18,0	1,4%		-	-		18,8	2,0%	
	-	-		18,4	0,8%		18,2	2,2%		19,4	1,1%	
	18,1	1,6%		18,3	0,3%		-	-		18,7	2,5%	
	18,39	$r_{\text{crit}} :$		18,25	$r_{\text{crit}} :$		18,60	$r_{\text{crit}} :$		19,18	$r_{\text{crit}} :$	
	0,50	1,534		0,17	1,534		0,45	1,534		0,42	1,645	
	3%	$r :$		1%	$r :$		2%	$r :$		2%	$r :$	
TF 154 dias	TF45			TF46			TF47			TF48		
	21,0	4,0%		20,0	0,2%		21,0	2,3%		21,0	0,0%	
	20,4	1,1%		21,6	7,7%		22,2	3,3%		19,8	5,7%	
	20,1	0,4%		18,5	7,7%		22,3	3,7%		19,9	5,2%	
	19,0	5,9%		20	0,2%		20,5	4,7%		22,3	6,2%	
	19,8	1,9%		20,5	2,2%		21,2	1,4%		21,0	0,0%	
	20,8	3,1%		19,7	1,7%		21,8	1,4%		22,0	4,8%	
	20,18	$r_{\text{crit}} :$		20,05	$r_{\text{crit}} :$		21,50	$r_{\text{crit}} :$		21,00	$r_{\text{crit}} :$	
	0,73	1,732		1,01	1,732		0,72	1,732		1,03	1,732	
	4%	$r :$		5%	$r :$		3%	$r :$		5%	$r :$	

QUADRO 36 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DAS LEITURAS DE RES, POR CP

(Continuação)

Amostra	CPs – RES e Dispersão (%) / Co.V < 10 % - Critério de Chauvenet: $r < r_{\text{crítico}}$											
TSCA 7 dias	TSCA1		TSCA2		TSCA3		TSCA4		TSCA5		TSCA6	
	15,8	1,9%	16,3	3,1%	15,4	0,9%	15,2	1,7%	15,5	1,4%	15,4	0,4%
	15,3	1,3%	16,5	4,3%	15,1	2,8%	15,4	0,4%	16,1	2,4%	16,1	4,1%
	16,9	9,0%	16,7	5,6%	15,1	2,8%	16,0	3,4%	15,7	0,1%	15,5	0,2%
	14,5	6,5%	15,5	2,0%	15,5	0,2%	16,5	6,7%	15,0	4,6%	15,3	1,1%
	15,0	3,2%	14,9	5,8%	16,2	4,3%	15,4	0,4%	16,8	6,9%	15,8	2,2%
	15,5	0,0%	15,0	5,2%	15,9	2,4%	14,3	7,5%	15,2	3,3%	14,7	5,0%
Nova Média	15,50	$r_{\text{crit}} :$	15,82	$r_{\text{crit}} :$	15,53	$r_{\text{crit}} :$	15,47	$r_{\text{crit}} :$	15,72	$r_{\text{crit}} :$	15,47	$r_{\text{crit}} :$
Sd	0,82	1,732	0,79	1,732	0,44	1,732	0,75	1,732	0,66	1,732	0,48	1,732
Co.V	5%	$r :$	5%	$r :$	3%	$r :$	5%	$r :$	4%	$r :$	3%	$r :$
		1,71		1,17		1,51		1,56		1,65		1,61
TSCA 28 dias	TSCA9		TSCA10		TSCA11		TSCA12		TSCA13		TSCA14	
	32,2	2,6%	28,5	0,1%	33,4	5,0%	35,6	3,5%	32,2	0,9%	32,0	2,9%
	31,0	1,2%	28,8	0,9%	31,1	2,2%	35,2	2,3%	30,4	4,8%	29,4	5,4%
	31,8	1,3%	-	-	30,4	4,4%	33,8	1,7%	33,0	3,4%	32,2	3,6%
	30,8	1,8%	28,6	0,2%	31,4	1,3%	31,9	7,3%	32,0	0,3%	31,4	1,0%
	-	-	28,5	0,1%	32,7	2,8%	33,2	3,5%	30,3	5,1%	30,2	2,8%
	31,1	0,9%	28,3	0,8%	31,8	0,0%	36,7	6,7%	33,6	5,3%	31,3	0,7%
Nova Média	31,38	$r_{\text{crit}} :$	28,54	$r_{\text{crit}} :$	31,80	$r_{\text{crit}} :$	34,40	$r_{\text{crit}} :$	31,92	$r_{\text{crit}} :$	31,08	$r_{\text{crit}} :$
Sd	0,59	1,645	0,18	1,645	1,09	1,732	1,76	1,732	1,34	1,732	1,08	1,732
Co.V	2%	$r :$	1%	$r :$	3%	$r :$	5%	$r :$	4%	$r :$	3%	$r :$
		1,38		1,43		1,46		1,42		1,25		1,56
TSCA 56 dias	TSCA17		TSCA18		TSCA19		TSCA20		TSCA21		TSCA22	
	51,8	0,5%	53,1	2,2%	52,2	0,2%	50,8	2,1%	50,6	3,9%	54,0	0,4%
	47,5	7,9%	50,9	6,2%	52,2	0,2%	-	-	48,1	1,2%	-	-
	48,4	6,1%	54,5	0,4%	49,3	5,3%	53,2	2,5%	44,1	9,4%	-	-
	53,4	3,6%	55,4	2,1%	49,9	4,2%	52,2	0,6%	46,1	5,3%	54,3	0,2%
	53,8	4,4%	53,7	1,1%	52,7	1,2%	51,5	0,8%	51,4	5,6%	54,4	0,4%
	54,4	5,5%	58,1	7,0%	56,2	7,9%	51,8	0,2%	51,8	6,4%	54,1	0,2%
Nova Média	51,55	$r_{\text{crit}} :$	54,28	$r_{\text{crit}} :$	52,08	$r_{\text{crit}} :$	51,90	$r_{\text{crit}} :$	48,68	$r_{\text{crit}} :$	54,20	$r_{\text{crit}} :$
Sd	2,93	1,732	2,41	1,732	2,44	1,732	0,89	1,645	3,12	1,732	0,18	1,534
Co.V	6%	$r :$	4%	$r :$	5%	$r :$	2%	$r :$	6%	$r :$	0%	$r :$
		1,38		1,58		1,68		1,46		1,47		1,10

QUADRO 36 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DAS LEITURAS DE RES, POR CP

(Continuação)

Amostra	CPs – RES e Dispersão (%) / Co.V < 10 % - Critério de Chauvenet: $r < r_{\text{crítico}}$												
TSCA 91 dias	TSCA30		TSCA31		TSCA32		TSCA33		TSCA34		TSCA35		
	91,8	1,4%	86,1	2,7%	85,2	2,0%	96,3	0,3%	89,5	5,0%	90,3	4,9%	
	87,1	3,8%	86,6	2,2%	-	-	98,0	2,1%	80,4	5,6%	92,9	2,1%	
	97,6	7,8%	91,0	2,8%	89,2	2,6%	97,5	1,6%	89,5	5,0%	93,6	1,4%	
	95,0	5,0%	90,5	2,2%	86,6	0,4%	89,6	6,7%	82,5	3,2%	98,7	4,0%	
	85,5	5,5%	86,6	2,2%	87,8	1,0%	93,3	2,8%	85,2	0,0%	99,0	4,3%	
	86,0	5,0%	90,4	2,1%	86,0	1,1%	101,3	5,5%	84,1	1,3%	95,1	0,2%	
	Nova Média	90,50	rcrit :	88,53	rcrit :	86,96	rcrit :	96,00	rcrit :	85,20	rcrit :	94,93	rcrit :
	Sd	5,08	1,732	2,32	1,732	1,57	1,645	4,07	1,732	3,70	1,732	3,41	1,732
	Co.V	6%	r :	3%	r :	2%	r :	4%	r :	4%	r :	4%	r :
		1,40		1,06		1,43		1,57		1,30		1,36	
TSCA 154 dias	TSCA45		TSCA46		TSCA47		TSCA48		TSCA49		TSCA50		
	128	0,5%	144	4,6%	142	1,8%	123	0,4%	124	4,9%	133	3,4%	
	126	1,0%	143	3,8%	139	0,0%	124	1,5%	128	2,3%	133	3,4%	
	130	1,9%	133	3,4%	137	1,6%	120	2,2%	128	1,9%	124	4,1%	
	128	0,4%	131	5,0%	142	1,6%	126	2,9%	133	2,2%	119	8,1%	
	-	-	137	0,1%	136	2,3%	121	1,1%	137	4,7%	131	1,3%	
	125	1,8%	138	0,1%	140	0,5%	120	1,5%	133	2,1%	134	4,0%	
	Nova Média	127,7	rcrit :	137,5	rcrit :	139,4	rcrit :	122,2	rcrit :	130,5	rcrit :	128,9	rcrit :
	Sd	1,88	1,645	5,18	1,732	2,35	1,732	2,39	1,732	4,70	1,732	6,40	1,732
	Co.V	1%	r :	4%	r :	2%	r :	2%	r :	4%	r :	5%	r :
		1,31		1,32		1,36		1,48		1,37		1,62	
TCV 7 dias	TCV1		TCV2		TCV3		TCV4		TCV5		TCV6		
		11,0 %											
	12,9		11,7	2,5%	10,8	3,7%	11,0	0,6%	10,6	3,8%	10,5	7,6%	
	11,1	4,4%	12,3	2,5%	11,1	1,0%	11,3	2,1%	10,5	4,7%	11,1	2,3%	
	11,4	1,9%	11,8	1,7%	10,8	3,7%	12,0	8,4%	11,5	4,4%	11,5	1,2%	
	12,1	4,2%	12,1	0,8%	11,4	1,7%	10,2	7,8%	12,0	8,9%	12,0	5,6%	
	10,5	9,6%	12,1	0,8%	-	-	10,7	3,3%	11,1	0,8%	11,7	2,9%	
	11,7	0,7%	-	-	11,96	6,7%	11,2	1,2%	10,4	5,6%	11,4	0,3%	
	Nova Média	11,62	rcrit :	12,00	rcrit :	11,21	rcrit :	11,07	rcrit :	11,02	rcrit :	11,37	rcrit :
	Sd	0,83	1,732	0,24	1,645	0,49	1,645	0,61	1,732	0,64	1,732	0,52	1,732
	Co.V	7%	r :	2%	r :	4%	r :	5%	r :	6%	r :	5%	r :
	1,55		1,22		1,54		1,54		1,54		1,67		

QUADRO 36 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DAS LEITURAS DE RES, POR CP

(Conclusão)

Amostra	CPs – RES e Dispersão (%) / Co.V < 10 % - Critério de Chauvenet: $r < r_{\text{crítico}}$											
TCV 28 dias	TCV9		TCV10		TCV11		TCV12		TCV13		TCV14	
	20,1	1,4%	20,6	1,1%	20,1	1,5%	20,8	1,3%	21,5	4,4%	19,3	4,2%
	18,6	6,1%	20,8	2,0%	19,7	0,5%	20,5	0,2%	20,2	1,9%	21,5	6,7%
	20,9	5,5%	21,2	4,0%	18,5	6,6%	20,5	0,2%	20,8	1,0%	19,4	3,7%
	20,0	0,9%	20,5	0,6%	19,4	2,0%	20,5	0,2%	20,0	2,9%	20,3	0,7%
	18,9	4,6%	19,5	4,3%	20,0	1,0%	20,8	1,3%	20,0	2,9%	20,0	0,7%
	20,4	2,9%	19,7	3,4%	21,1	6,6%	20,1	2,1%	21,1	2,4%	20,4	1,2%
	Nova Média		20,38		19,80		20,53		20,60		20,15	
	$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$	
	Sd		0,66		0,86		0,26		0,63		0,80	
	$1,732$		$1,732$		$1,732$		$1,732$		$1,732$		$1,732$	
	Co.V		3%		4%		1%		3%		4%	
	$r :$		$r :$		$r :$		$r :$		$r :$		$r :$	
	$1,37$		$1,35$		$1,52$		$1,68$		$1,43$		$1,68$	
TCV 56 dias	TCV17		TCV18		TCV19		TCV20		TCV21		TCV22	
	45,1	4,1%	43,0	1,3%	45,1	4,8%	-	-	41,7	6,6%	46,1	5,8%
	41,9	3,3%	44,2	4,1%	44,6	3,6%	42,3	1,0%	45,7	2,4%	44,8	2,8%
	44,9	3,6%	42,7	0,6%	42,6	1,0%	41,8	0,2%	45,2	1,3%	44,1	1,2%
	43,5	0,4%	-	-	40,4	6,1%	42,3	1,0%	43,2	3,2%	42,4	2,7%
	42,1	2,8%	40,2	5,3%	42,5	1,2%	41,5	0,9%	46,7	4,6%	40,5	7,0%
	42,5	1,9%	42,1	0,8%	43,0	0,1%	41,5	0,9%	45,3	1,5%	43,5	0,2%
	Nova Média		42,44		43,03		41,88		44,63		43,57	
	$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$	
	Sd		1,47		1,68		0,40		1,83		1,95	
	$1,732$		$1,645$		$1,732$		$1,645$		$1,732$		$1,732$	
	Co.V		3%		4%		1%		4%		4%	
	$r :$		$r :$		$r :$		$r :$		$r :$		$r :$	
	$1,26$		$1,53$		$1,57$		$1,04$		$1,60$		$1,57$	
TCV 154 dias	TCV45		TCV46		TCV47		TCV48		TCV49		TCV50	
	-	-	101	2,4%	105	1,2%	-	-	109	0,5%	106	1,1%
	111	0,5%	103	0,3%	-	-	103	0,2%	109	1,0%	111	3,6%
	111	0,3%	102	0,9%	100	4,0%	103	0,1%	-	-	108	0,3%
	-	-	107	3,6%	106	1,8%	102	1,4%	109	0,4%	-	-
	111	0,0%	-	-	105	0,9%	-	-	112	1,9%	-	-
	110	0,8%	-	-	-	-	105	1,5%	-	-	104	2,8%
	Nova Média		103,0		103,8		103,0		109,9		107,2	
	$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$	
	Sd		2,60		2,78		1,23		1,44		2,93	
	$1,534$		$1,534$		$1,534$		$1,534$		$1,534$		$1,534$	
	Co.V		1,39		1,41		1,28		1,47		1,33	

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 37 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DA RES, POR TRAÇO

(Continua)

Traço	RES e Dispersão (%) / Co.V < 10 % - Critério de Chauvenet: $r < r_{\text{crítico}}$									
	7 dias		28 dias		56 dias		91 dias		154 dias	
TR	14,5	1,1%	24,2	0,5%	27,0	0,8%	33,7	2,8%	36,3	2,6%
	14,0	2,9%	-	-	26,5	2,5%	31,9	2,7%	39,7	6,7%
	14,3	0,5%	23,8	0,8%	27,5	1,0%	33,7	2,8%	37,1	0,4%
	14,6	1,9%	24,1	0,2%	27,8	2,1%	31,7	3,2%	38,3	2,8%
	14,6	1,9%	24,1	0,2%	27,8	2,1%	31,7	3,2%	34,8	6,6%
	14,2	1,3%	24,0	0,2%	26,7	2,0%	33,9	3,3%	-	-
Média (kΩcm)	14,37	$r_{\text{crítico}}$:	24,02	$r_{\text{crítico}}$:	27,19	$r_{\text{crítico}}$:	32,77	$r_{\text{crítico}}$:	37,22	$r_{\text{crítico}}$:
Sd	0,28	1,732	0,12	1,645	0,56	1,732	1,08	1,732	1,90	1,645
Co.V	2%	r :	0%	r :	2%	r :	3%	r :	5%	r :
		1,51		1,55		1,24		1,02		1,32
	7 dias		28 dias		56 dias		91 dias		154 dias	
TM	26,9	1,0%	60,5	5,3%	108	15,9%	80,9	3,2%	73,1	3,6%
	26,9	1,0%	63,8	0,2%	84,9	9,2%	82,1	4,7%	-	-
	26,6	1,9%	-	-	96,0	2,7%	77,6	1,0%	84,5	11,3%
	27,8	2,4%	66,3	3,8%	95,3	2,0%	75,4	3,8%	72,9	3,9%
	27,8	2,4%	66,3	3,8%	95,3	2,0%	75,4	3,8%	72,9	3,8%
	26,9	0,9%	62,6	2,1%	81,0	13,4%	79,0	0,7%	-	-
Média (kΩcm)	27,13	$r_{\text{crítico}}$:	63,92	$r_{\text{crítico}}$:	93,48	$r_{\text{crítico}}$:	78,38	$r_{\text{crítico}}$:	75,85	$r_{\text{crítico}}$:
Sd	0,51	1,732	2,49	1,645	9,62	1,732	2,80	1,732	5,74	1,534
Co.V	2%	r :	4%	r :	10%	r :	4%	r :	8%	r :
		1,27		1,36		1,54		1,33		1,50
	7 dias		28 dias		56 dias		91 dias		154 dias	
TF	11,7	0,0%	15,9	2,9%	19,6	0,8%	18,4	1,5%	20,2	3,7%
	-	-	-	-	18,6	5,9%	18,3	2,2%	20,1	4,3%
	11,8	0,4%	16,7	2,1%	21,3	7,7%	18,6	0,3%	21,5	2,6%
	11,7	0,6%	16,6	1,4%	19,3	2,5%	19,2	2,8%	21,0	0,2%
	11,7	0,6%	16,6	1,4%	19,3	2,5%	19,2	2,8%	22,1	5,3%
	11,8	0,7%	16,0	2,1%	20,5	3,9%	18,4	1,5%	-	-
Média (kΩcm)	11,72	$r_{\text{crítico}}$:	16,32	$r_{\text{crítico}}$:	19,76	$r_{\text{crítico}}$:	18,66	$r_{\text{crítico}}$:	20,96	$r_{\text{crítico}}$:
Sd	0,07	1,645	0,38	1,645	0,97	1,732	0,42	1,732	0,86	1,645
Co.V	1%	r :	2%	r :	5%	r :	2%	r :	4%	r :
		1,23		1,26		1,55		1,24		1,29

QUADRO 37 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DA RES, POR TRAÇO

(Conclusão)

Traço	RES e Dispersão (%) / Co.V < 10 % - Critério de Chauvenet: $r < r_{\text{crítico}}$									
TSCA	7 dias		28 dias		56 dias		91 dias		154 dias	
	15,5	0,1%	31,4	1,7%	51,6	2,1%	90,5	1,8%	128	2,5%
	-	-	28,5	10,6%	54,3	3,1%	88,5	3,9%	138	4,9%
	15,5	0,3%	31,8	0,4%	52,1	1,1%	87,0	5,6%	139	6,4%
	15,5	0,1%	34,4	7,7%	51,9	1,4%	96,0	4,2%	122	6,7%
	15,5	0,1%	34,4	7,7%	51,9	1,4%	96,0	4,2%	131	0,4%
	15,5	0,1%	31,1	2,7%	54,2	2,9%	94,9	3,0%	129	1,6%
Média (kΩcm)	15,49	$r_{\text{crítico}}$:	31,93	$r_{\text{crítico}}$:	52,65	$r_{\text{crítico}}$:	92,15	$r_{\text{crítico}}$:	131,06	$r_{\text{crítico}}$:
Sd	0,03	1,645	2,22	1,732	1,24	1,732	4,00	1,732	6,40	1,732
Co.V	0%	r:	7%	r:	2%	r:	4%	r:	5%	r:
		1,57		1,53		1,31		1,30		1,37
TCV	7 dias		28 dias		56 dias		91 dias		154 dias	
	11,6	2,0%	19,8	1,9%	43,3	1,5%	-	-	-	-
	12,0	5,4%	20,4	0,9%	42,4	0,6%	-	-	103	2,2%
	11,2	1,5%	19,8	2,0%	43,0	0,8%	-	-	104	1,5%
	11,1	2,8%	20,5	1,6%	41,9	1,9%	-	-	103	2,2%
	11,1	2,8%	20,5	1,6%	41,9	1,9%	-	-	110	4,3%
	11,4	0,2%	20,2	0,3%	43,6	2,1%	-	-	107	1,7%
Média (kΩcm)	11,39	$r_{\text{crítico}}$:	20,20	$r_{\text{crítico}}$:	42,69	$r_{\text{crítico}}$:	-	$r_{\text{crítico}}$:	105,39	$r_{\text{crítico}}$:
Sd	0,36	1,732	0,34	1,732	0,73	1,732	-	N.A.	3,04	1,645
Co.V	3%	r:	2%	r:	2%	r:	-	r:	3%	r:
		1,68		1,20		1,20		-		1,47

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 38 – RES: APLICAÇÃO DO FATOR DE FORMA E TRANSFORMAÇÃO DE UNIDADES

(Continua)

RES (Ωm) = $Y_i \times 0,377 \times 10$										
Idade \ Traços	TR		TM		TF		TSCA		TCV	
7	54,7	55,2	101,2	104,7	44,2	43,9	58,4	58,3	43,8	41,7
	52,6	55,2	101,2	104,7	-	43,9	-	58,3	45,2	41,7
	53,9	53,4	100,4	101,4	44,4	44,5	58,6	58,3	42,3	42,9
		54,2		102,3		44,2		58,4		42,9
28	91,0	90,7	228,2	250,0	59,8	62,4	118,3	129,7	74,7	77,4
	-	90,7	240,5	250,0	-	62,4	107,6	129,7	76,8	77,4
	89,9	90,4	-	236,0	62,8	60,3	119,9	117,2	74,6	76,0
		90,6		241,0		61,5		120,4		76,2

QUADRO 38 – RES: APLICAÇÃO DO FATOR DE FORMA E TRANSFORMAÇÃO DE UNIDADES

(Conclusão)

RES (Ωm) = $Y_i \times 0,377 \times 10$										
Idade \ Traços	TR		TM		TF		TSCA		TCV	
56 Média (Ωm)	101,7	104,7	408,3	359,4	73,9	72,7	194,3	195,7	163,4	157,9
	99,9	104,7	320,1	359,4	70,1	72,7	204,6	195,7	160,0	157,9
	103,5	100,5	362,0	305,2	80,2	77,4	196,4	204,3	162,2	164,2
		102,5		352,4		74,5		198,5		160,9
91 Média (Ωm)	127,0	119,6	305,0	284,2	69,3	72,3	341,2	361,9	-	-
	120,3	119,6	309,5	284,2	68,8	72,3	333,8	361,9	-	-
	127,0	127,7	292,5	297,6	70,1	69,3	327,8	357,9	-	-
		123,5		295,5						
154 Média (Ωm)	136,7	144,3	275,6	274,8	76,1	79,2	481,6	460,9	-	388,4
	149,8	131,1	-	275,0	75,6	83,2	518,4	492,0	388,4	414,2
	139,7	-	318,4	-	81,1	-	525,5	486,0	391,4	404,1
		140,3		285,9		79,0		494,1		397,3

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 39 – TWO-WAY ANOVA RES: DADOS (1)

Composição de aglomerantes (B)											
Tempo de cura (A)	TR		TM		TF		TSCA		TCV	T _i	Bin
7	54,7	55,2	101,2	104,7	44,2	43,9	58,4	58,3	43,8	41,7	1709 28 61
	52,6	55,2	101,2	104,7	-	43,9	-	58,3	45,2	41,7	
	53,9	53,4	100,4	101,4	44,4	44,5	58,6	58,3	42,3	42,9	
28	91,0	90,7	228,2	250,0	59,8	62,4	118,3	129,7	74,7	77,4	3145 27 116
	-	90,7	240,5	250,0	-	62,4	107,6	129,7	76,8	77,4	
	89,9	90,4	-	236,0	62,8	60,3	119,9	117,2	74,6	76,0	
56	101,7	104,7	408,3	359,4	73,9	72,7	194,3	195,7	163,4	157,9	5333 30 178
	99,9	104,7	320,1	359,4	70,1	72,7	204,6	195,7	160,0	157,9	
	103,5	100,5	362,0	305,2	80,2	77,4	196,4	204,3	162,2	164,2	
91	127,0	119,6	305,0	284,2	69,3	72,3	341,2	361,9	-	-	5021 24 209
	120,3	119,6	309,5	284,2	68,8	72,3	333,8	361,9	-	-	
	127,0	127,7	292,5	297,6	70,1	69,3	327,8	357,9	-	-	
154	136,7	144,3	275,6	274,8	76,1	79,2	481,6	460,9	-	388,4	7192 25 288
	149,8	131,1	-	275,0	75,6	83,2	518,4	492,0	388,4	414,2	
	139,7	-	318,4	-	81,1	-	525,5	486,0	391,4	404,1	
T _j	2836	28	6850	27	1793	27	7254	29	3.667	23	ABn= 134
A _{jn}	101,28	253,69	66,40	66,40	250,15	159,43	1987	5	397	167	T= 22399

FONTE: O autor (2023).

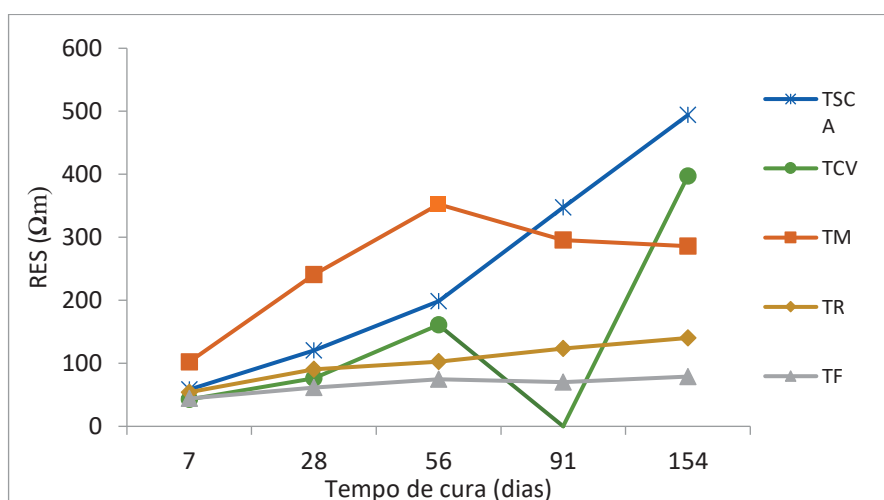
QUADRO 40 – TWO-WAY ANOVA RES (1)

TC = T... ² / ABn	3.744.248				
SQA = ∑(Ti.. ² / B.n) – TC	793.534				
SQB = ∑(T.j. ² / A.n) – TC	798.925				
SQAB = ∑(Tij. ² / nij) – TC – SQA - SQB	566.989				
SQT = ∑(Yijk ²) – TC	2.173.896				
SQR = SQT-SQA-SQB-SQAB	14.448				
Fonte de Variação	Somas dos Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F*	F tab*
Tempo de cura (A)	793.533	4	198.383	1.496	2,45
Composição de aglomerantes (B)	798.925	4	199.731	1.507	2,45
combinação dos efeitos A e B	566.989	16	35.436	267	1,74
Erro	14.448	109	132		
Total	2.173.896	133			

NOTA – * $F_c > F_{tab}$, com 95% de confiabilidade, há distinção entre grupos em todos os casos!

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 77 – GRÁFICO DE FATORES: RES X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (1)



FONTE: O autor (2023).

Observa-se na Figura 77 que há uma possível incoerência na ordenada da série TM, na ordenada 56, caso a ser confirmado pelo teste de Tukey. A depressão da série TCV é explicada pela ausência de resultados.

QUADRO 41 – LIMITE DE DECISÃO: RES X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	4,1
$L.D = 3 \times S_x$	12,30

FONTE: O autor (2023).

TABELA 46 – TESTE DE TUKEY: RES DO TRAÇO TM

Tempo de cura	7	28	154	91	56
TM	102,3	234	273	301	352
Diferenças entre grupos	131,6	39,0	28,1	51,3	

FONTE: O autor (2023).

Observa-se na Tabela 46, que há distinção estatística entre todos os grupos apresentados. Isso confirma a incoerência identificada na Figura 77. Sendo assim, optou-se por eliminar o grupo de dados TM 56 como elemento espúrio.

QUADRO 42 – TWO-WAY ANOVA RES: DADOS (2)

Tempo de cura (A)	Composição de aglomerantes (B)						T _i Bin	
	TR	TM	TF	TSCA	TCV			
7	54,7 55,2	101,2 104,7	44,2 43,9	58,4 58,3	43,8 41,7			
	52,6 55,2	101,2 104,7	- 43,9	- 58,3	45,2 41,7			
	53,9 53,4	100,4 101,4	44,4 44,5	58,6 58,3	42,3 42,9		1709 28 61	
28	91,0 90,7	228,2 250,0	59,8 62,4	118,3 129,7	74,7 77,4	258 6 42,9		
	- 90,7	240,5 250,0	- 62,4	107,6 129,7	76,8 77,4			
	89,9 90,4	- 236,0	62,8 60,3	119,9 117,2	74,6 76,0		3145 27 116	
56	101,7 104,7	1205 5 241	73,9 72,7	194,3 195,7	163,4 157,9	457 6 76,2		
	99,9 104,7	- -	70,1 72,7	204,6 195,7	160,0 157,9			
	103,5 100,5	- -	80,2 77,4	196,4 204,3	162,2 164,2		3219 24 134	
91	127,0 119,6	305,0 284,2	69,3 72,3	341,2 361,9	- -	966 6 161		
	120,3 119,6	309,5 284,2	68,8 72,3	333,8 361,9	- -			
	127,0 127,7	292,5 297,6	70,1 69,3	327,8 357,9	- -		5021 24 209	
154	136,7 144,3	275,6 274,8	76,1 79,2	481,6 460,9	- 388,4	0 0		
	149,8 131,1	- 275,0	75,6 83,2	518,4 492,0	388,4 414,2			
	139,7 -	318,4 -	81,1 -	525,5 486,0	391,4 404,1		7192 25 288	
T _j A _{jn}	702 5 140	1144 4 286	395 5 79,0	2965 6 494	1987 5 397			
	2836 28	4735 21	1793 27	7254 29	3.667 23		ABn= 128	
	101,28	225,49	66,40	250,15	159,43		T= 20285	
							Y= 158	

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 43 – TWO-WAY ANOVA RES (2)

TC = T... ² / ABn	3.214.668				
SQA = ∑(Ti.. ² / B.n) – TC	806.717				
SQB = ∑(T.j. ² / A.n) – TC	658.553				
SQAB = ∑(Tij. ² / nij) – TC – SQA - SQB	566.989				
SQT = ∑(Yijk ²) – TC	1.951.776				
SQR = SQT-SQA-SQB-SQAB	7.866				
Fonte de Variação	Somas dos Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F*	F tab*
Tempo de cura (A)	806717	4	201679	2641	2,46
Composição de aglomerantes (B)	658552	4	164638	2156	2,46
combinação dos efeitos A e B	478640	16	29915	392	1,74
Erro	7865	103	76		
Total	1951776	127			

NOTA: *Observações – $F_c > F_{tab}$, há distinção entre grupos em todos os casos!!!

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 44 – LIMITE DE DECISÃO: RES X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	3,2
L.D = 3 x S_x	9,554

FONTE: O autor (2023).

TABELA 47 – TESTE DE TUKEY: RES X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

(Continua)					
Tempo de cura \ Traço	TCV	TF	TR	TSCA	TM
7 dias	43,0	44,2	54,2	58,4	102
Diferenças entre grupos	1,2	10,0	4,2	43,9	
	<L.D		<L.D		
	TF	TCV	TR	TSCA	TM
28 dias	61,5	76,2	90,6	120	241
Diferenças entre grupos	14,6	14,4	29,8	120,6	
	TF	TR	TCV	TSCA	TM
56 dias	74,5	03	161	199	-
Diferenças entre grupos	28,5	58,0	38,0	-	

TABELA 47 – TESTE DE TUKEY: RES X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

(Conclusão)					
Tempo de cura \ Traço	TF	TR	TCV	TM	TSCA
91 dias	70,4	124	-	295	347
Diferenças entre grupos	53,6			52,0	
	TF	TR	TM	TCV	TSCA
154 dias	79,0	140	286	397	494
Diferenças entre grupos	61,0	146,0	110,0	97,1	

FONTE: O autor (2023).

TABELA 48 – TESTE DE TUKEY: RES X TEMPO DE CURA

Traço \ Tempo de cura (dias)	7	28	56	91	154
TR	54,2	90,6	103	124	140
Diferenças entre grupos		36,4	12,4	21,0	16,0
	7	28	56	154	91
TM	102,0	241,0	-	286,0	295,0
Diferenças entre grupos		139,0	27,0	-	9,00 <L.D
	7	28	91	56	154
TF	44,2	61,5	70,4	74,5	79,0
Diferenças entre grupos		17,3	8,9 <L.D	4,1	4,5 9 <L.D
	7	28	56	91	154
TSCA	58,4	120	199	347	494
Diferenças entre grupos		62,0	78,1	148,9	146,7
	7	28	56	91	154
TCV	42,9	76,2	161	-	397
Diferenças entre grupos		33,3	84,8		-

FONTE: O autor (2023).

TABELA 49 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL

Tempo de cura	TR	TM	TF	TSCA	TCV
7	54,2	102	44,2	58,4	42,9
28	90,6	241	61,5	120	76,2
56	103	-	74,5	199	161
91	124	295	70,4	347	-
154	140	286	79,0	494	397

FONTE: O autor (2023).

APÊNDICE 4 – RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA

QUADRO 45 – LEITURAS DE REV POR CP

(Continua)

Amostra	Parâmetro \ CP		Eletrodos	TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
TR 7 dias	Leitura 1	Tensão (V)	0,99	6,830	6,830	6,830	6,830	6,800	6,810
		Corrente (mA)	115,2	5,020	4,840	4,990	4,990	5,550	5,290
	Leitura 2	Tensão (V)		6,830	6,830	6,830	6,820	6,800	6,810
		Corrente (mA)		5,010	4,850	4,990	4,980	5,560	5,300
	Resistência média, $R = Tensão/Corrente$ (kΩ)		0,009	1,362	1,410	1,369	1,369	1,224	1,286
	Resultado	Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{eletrodos}$ (kΩ)		1,353	1,401	1,360	1,361	1,216	1,278
		Resistividade do CP, $\rho_{CP}=R_{CP} A/L^*$ (Ωm)		353,5	353,4	353,7	354,8	347,8	350,7
TR 28 dias			Eletrodos	TR9	TR10	TR11	TR12	TR13	TR14
	Leitura 1	Tensão (V)	0,724	6,96	6,95	6,96	6,96	6,95	6,96
		Corrente (mA)	117,2	3,03	3,20	3,04	3,06	3,13	3,02
	Leitura 2	Tensão (V)		6,96	6,95	6,96	6,96	6,95	6,96
		Corrente (mA)		3,03	3,19	3,05	3,06	3,12	3,01
	Resistência média, $R = Tensão/Corrente$ (kΩ)		0,006	2,297	2,175	2,286	2,275	2,224	2,308
	Resultado	Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{eletrodos}$ (kΩ)		2,291	2,169	2,280	2,268	2,218	2,302
	Resistividade do CP, $\rho_{CP}=R_{CP} A/L^*$ (Ωm)		91,3	85,7	91,0	89,2	87,5	92,6	

QUADRO 45 – LEITURAS DE REV POR CP

(Continuação)

Amostra	Parâmetro \ CP	Eletrodos	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
TM 7 dias	Leitura 1	Tensão (V)	1,09	6,97	6,97	6,99	6,98	6,97
	Corrente (mA)	113,4	2,84	2,91	2,85	2,65	2,85	2,85
	Leitura 2	Tensão (V)	6,97	6,97	6,98	6,99	6,97	6,97
	Corrente (mA)	2,83	2,92	2,81	2,63	2,86	2,86	2,86
	Resistência média, $R = Tensão/Corrente$ (k Ω)		0,010	2,391	2,465	2,648	2,443	2,441
	Resultado Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{eletrodos}$ (k Ω)		2,451	2,381	2,455	2,638	2,433	2,432
TM 28 dias	Resistividade do CP, $\rho_{CP} = R_{CP} A/L^*$ (Ωm)		99,3	94,24	96,7	103,2	96,4	97,9
	Leitura 1	Tensão (V)	0,99	7,03	7,03	7,05	7,04	7,05
	Corrente (mA)	119,5	1,32	1,26	1,39	1,16	1,22	1,18
	Leitura 2	Tensão (V)	7,03	7,04	7,03	7,05	7,04	7,05
	Corrente (mA)	1,32	1,27	1,40	1,16	1,23	1,18	1,18
	Resultado Resistência média, $R = Tensão/Corrente$ (k Ω)		0,008	5,326	5,039	6,078	5,747	5,975
TM 56 dias	Resistividade do CP, $\rho_{CP} = R_{CP} A/L^*$ (Ωm)		218,7	221,6	202,9	239,9	226,9	240,3
	Leitura 1	Tensão (V)	1,27	7,10	7,09	7,09	7,09	7,08
	Corrente (mA)	110,5	0,75	0,88	0,80	0,80	0,75	0,95
	Leitura 2	Tensão (V)	7,09	7,08	7,09	7,09	7,09	7,08
	Corrente (mA)	0,75	0,87	0,80	0,80	0,75	0,75	0,95
	Resultado Resistência média, $R = Tensão/Corrente$ (k Ω)		0,011	8,097	8,863	8,863	9,453	7,453
	Resistividade do CP, $\rho_{CP} = R - R_{eletrodos}$ (k Ω)		9,449	8,086	8,851	8,851	9,442	7,441
	Resultado Resistividade do CP, $\rho_{CP} = R_{CP} A/L^*$ (Ωm)		377,3	324,4	366,6	359,0	385,6	314,4

QUADRO 45 – LEITURAS DE REV POR CP

(Continuação)

Amostra	Parâmetro \ CP	Eletrodos	TM30	TM31	TM32	TM33	TM34	TM35
TM 91 dias	Leitura 1	Tensão (V)	0,851	6,95	6,96	6,95	6,94	6,95
	Corrente (mA)	117	0,965	0,929	0,982	1,026	0,957	0,939
	Leitura 2	Tensão (V)	6,95	6,96	6,95	6,94	6,95	6,95
	Corrente (mA)	0,968	0,924	0,984	1,027	0,956	0,947	
	Resistência média, $R = \text{Tensão/Corrente (k}\Omega\text{)}$		0,007	7,512	7,070	6,761	7,266	7,370
Resultado	Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{\text{eletrodos (k}\Omega\text{)}}$		7,184	7,505	7,063	6,754	7,259	7,363
	Resistividade do CP, $\rho_{CP} = R_{CP} A/L^* (\Omega\text{m})$		294,5	307,6	281,624	274,0	295,4	296,5
TM 154 dias	Leitura 1	Tensão (V)	0,657	6,93	6,93	6,95	6,94	6,94
	Corrente (mA)	120,2	1,045	1,042	0,919	0,926	0,962	0,98
	Leitura 2	Tensão (V)	6,93	6,93	6,95	6,94	6,94	6,94
	Corrente (mA)	1,042	1,047	0,922	0,945	0,967	0,988	
	Resistência média, $R = \text{Tensão/Corrente (k}\Omega\text{)}$		0,005	6,641	7,550	7,419	7,195	7,053
Resultado	Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{\text{eletrodos (k}\Omega\text{)}}$		6,636	6,629	7,545	7,414	7,190	7,047
	Resistividade do CP, $\rho_{CP} = R_{CP} A/L^* (\Omega\text{m})$		270,7	263,3	310,6	297,6	301,9	281,2
TF 7 dias	Leitura 1	Tensão (V)	0,51	6,76	6,76	6,77	6,77	6,77
	Corrente (mA)	120,4	6,54	6,53	6,20	6,26	6,70	6,3
	Leitura 2	Tensão (V)	6,76	6,75	6,77	6,77	6,75	6,77
	Corrente (mA)	6,51	6,55	6,22	6,27	6,69	6,31	
	Resistência média, $R = \text{Tensão/Corrente (k}\Omega\text{)}$		0,004	1,036	1,090	1,081	1,008	1,074
Resultado	Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{\text{eletrodos (k}\Omega\text{)}}$		1,032	1,029	1,086	1,076	1,004	1,070
	Resistividade do CP, $\rho_{CP} = R_{CP} A/L^* (\Omega\text{m})$		41,4	41,4	43,7	43,3	40,0	42,6

QUADRO 45 – LEITURAS DE REV POR CP

(Continuação)

Amostra	Parâmetro \ CP	Eletrodos	TF45	TF46	TF47	TF48	TF49	-
TF 154 dias	Leitura 1 Tensão (V)	0,468	6,91	6,91	6,92	6,92	6,93	-
	Corrente (mA)	122,1	3,68	3,57	3,44	3,36	3,22	-
	Leitura 2 Tensão (V)	6,91	6,91	6,91	6,91	6,92	6,93	-
	Corrente (mA)	3,68	3,59	3,47	3,38	3,23	3,23	-
	Resistência média, $R = Tensão/Corrente$ (k Ω)	0,004	1,878	1,930	2,001	2,053	2,149	-
Resultado	Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{eletrodos}$ (k Ω)		1,874	1,926	1,998	2,050	2,145	-
	Resistividade do CP, $\rho_{CP} = R_{CP} A/L^*$ (Ωm)		76,8	77,1	79,4	83,0	86,5	-
TSCA 7 dias	Leitura 1 Tensão (V)	0,59	6,82	6,82	6,84	6,84	6,84	6,84
	Corrente (mA)	118,9	5,09	5,02	4,83	4,85	4,77	4,79
	Leitura 2 Tensão (V)	6,82	6,82	6,82	6,83	6,84	6,84	6,84
	Corrente (mA)	5,10	5,03	4,85	4,85	4,79	4,78	4,78
	Resistência média, $R = Tensão/Corrente$ (k Ω)	0,005	1,339	1,357	1,412	1,410	1,431	1,429
Resultado	Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{eletrodos}$ (k Ω)		1,334	1,352	1,407	1,405	1,426	1,425
	Resistividade do CP, $\rho_{CP} = R_{CP} A/L^*$ (Ωm)		52,1	54,5	56,1	57,1	56,1	57,9
TSCA 28 dias	Leitura 1 Tensão (V)	0,585	6,98	6,97	6,98	6,99	6,99	6,99
	Corrente (mA)	119,8	2,53	2,78	2,48	2,41	2,47	2,43
	Leitura 2 Tensão (V)	6,98	6,98	6,97	6,98	6,99	6,99	6,99
	Corrente (mA)	2,53	2,78	2,48	2,48	2,41	2,46	2,43
	Resistência média, $R = Tensão/Corrente$ (k Ω)	0,005	2,759	2,507	2,815	2,900	2,836	2,877
Resultado	Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{eletrodos}$ (k Ω)		2,754	2,502	2,810	2,896	2,831	2,872
	Resistividade do CP, $\rho_{CP} = R_{CP} A/L^*$ (Ωm)		113,3	101,5	114,3	119,8	116,0	115,7

QUADRO 45 – LEITURAS DE REV POR CP

(Continuação)

Amostra	Parâmetro \ CP		Eletrodos										TSCA21		TSCA22	
TSCA 56 dias	Leitura 1	Tensão (V)	1,159	7,04	7,04	7,03	7,04	7,03	7,03	7,04	7,03	7,03	7,03	7,03	7,03	7,03
		Corrente (mA)	111,7	1,41	1,25	1,46	1,31	1,41	1,39	1,41	1,39	1,41	1,39	1,41	1,41	1,41
	Leitura 2	Tensão (V)	7,04	7,04	7,03	7,03	7,04	7,03	7,03	7,04	7,03	7,03	7,03	7,03	7,03	7,03
		Corrente (mA)	1,41	1,41	1,26	1,44	1,31	1,44	1,39	1,31	1,39	1,39	1,39	1,42	1,42	1,42
	Resistência média, $R = Tensão/Corrente$ (k Ω)		0,010	4,993	5,610	4,849	5,374	5,058	5,058	4,968	5,058	4,968	5,058	5,058	4,968	4,968
	Resultado	Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{eletrodos}$ (k Ω)	4,983	5,599	4,838	5,364	5,047	5,047	4,958	5,047	5,047	4,958	5,047	5,047	4,958	4,958
TSCA 91 dias	Resistividade do CP, $\rho_{CP} = R_{CP} A/L^*$ (Ωm)		209,9	225,4	202,1	216,4	204,6	206,3	206,3	204,6	206,3	206,3	204,6	206,3	206,3	206,3
	Eletrodos															
	Leitura 1	Tensão (V)	1,258	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07
		Corrente (mA)	116	0,768	0,83	0,822	0,741	0,834	0,799	0,741	0,834	0,799	0,834	0,799	0,799	0,799
	Leitura 2	Tensão (V)	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07
		Corrente (mA)	0,769	0,831	0,82	0,747	0,834	0,805	0,805	0,747	0,834	0,805	0,834	0,805	0,805	0,805
TSCA 154 dias	Resistência média, $R = Tensão/Corrente$ (k Ω)		0,011	9,200	8,513	8,611	9,503	8,477	8,816	9,503	8,477	8,816	9,503	8,477	8,816	8,816
	Resultado	Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{eletrodos}$ (k Ω)	9,189	8,502	8,601	9,492	8,466	8,805	8,805	9,492	8,466	8,805	9,492	8,466	8,805	8,805
	Resistividade do CP, $\rho_{CP} = R_{CP} A/L^*$ (Ωm)		369,2	336,4	343,3	368,8	345,5	359,0	359,0	368,8	345,5	359,0	368,8	345,5	359,0	359,0
	Eletrodos															
	Leitura 1	Tensão (V)	0,394	7,00	7,00	7,01	7,00	7,00	7,01	7,00	7,00	7,01	7,00	7,00	7,01	7,01
		Corrente (mA)	122,7	0,686	0,668	0,618	0,659	0,647	0,662	0,659	0,647	0,662	0,659	0,647	0,662	0,662
TSCA 154 dias	Leitura 2	Tensão (V)	7,00	7,00	7,00	7,01	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
		Corrente (mA)	0,678	0,669	0,623	0,675	0,679	0,645	0,645	0,675	0,679	0,645	0,675	0,679	0,645	0,645
	Resistência média, $R = Tensão/Corrente$ (k Ω)		0,003	10,264	10,471	11,298	10,496	10,564	10,721	10,496	10,564	10,721	10,496	10,564	10,721	10,721
	Resultado	Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{eletrodos}$ (k Ω)	10,261	10,468	11,294	10,493	10,561	10,718	10,718	10,493	10,561	10,718	10,493	10,561	10,718	10,718
	Resistividade do CP, $\rho_{CP} = R_{CP} A/L^*$ (Ωm)		410,5	424,8	455,2	423,3	423,4	432,8	432,8	423,3	423,4	432,8	423,3	423,4	432,8	432,8

QUADRO 45 – LEITURAS DE REV POR CP

Amostra		Parâmetro \ CP				Eletrodos		(Continuação)					
TCV 7 dias	Leitura 1	Tensão (V)			0,67	6,81	6,81	6,81	6,82	6,80	6,79	6,79	
		Corrente (mA)			117,7	5,68	5,68	5,79	5,65	6,03	6,12	6,21	
	Leitura 2	Tensão (V)				6,81	6,81	6,81	6,82	6,80	6,79	6,79	
		Corrente (mA)				5,68	5,68	5,79	5,65	6,02	6,12	6,2	
	Resistência média, $R = Tensão/Corrente$ (k Ω)				0,006	1,199	1,176	1,207	1,129	1,109	1,094		
	Resultado	Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{eletrodos}$ (k Ω)				1,193	1,170	1,201	1,123	1,104	1,089		
	Resistividade do CP, $\rho_{CP}=R_{CP} A/L^*$ (Ωm)				47,6	46,8	47,7	45,1	43,9	44,0			
TCV 28 dias	Leitura 1	Tensão (V)			Eletrodos	TCV9	TCV10	TCV11	TCV12	TCV13	TCV14		
		Corrente (mA)			1,269	6,90	6,90	6,91	6,89	6,90	6,89		
	Leitura 2	Tensão (V)			109,9	3,79	3,70	3,61	3,98	3,68	3,96		
		Corrente (mA)				6,90	6,90	6,90	6,89	6,90	6,88		
	Resistência média, $R = Tensão/Corrente$ (k Ω)				0,012	1,821	1,865	1,910	1,733	1,872	1,736		
	Resultado	Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{eletrodos}$ (k Ω)				1,809	1,853	1,899	1,722	1,861	1,725		
	Resistividade do CP, $\rho_{CP}=R_{CP} A/L^*$ (Ωm)				76,4	77,5	78,1	76,9	78,3	72,1			
TCV 56 dias	Leitura 1	Tensão (V)			Eletrodos	TCV17	TCV18	TCV19	TCV20	TCV21	TCV22		
		Corrente (mA)			1,087	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02		
	Leitura 2	Tensão (V)			113,3	1,88	1,81	1,89	1,88	1,81	1,85		
		Corrente (mA)				7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02		
	Resistência média, $R = Tensão/Corrente$ (k Ω)				0,010	3,734	3,889	3,714	3,754	3,878	3,795		
	Resultado	Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{eletrodos}$ (k Ω)				3,724	3,880	3,705	3,745	3,869	3,785		
	Resistividade do CP, $\rho_{CP}=R_{CP} A/L^*$ (Ωm)				153,4	156,4	153,5	155,1	159,8	155,9			

QUADRO 45 – LEITURAS DE REV POR CP

Amostra		Parâmetro \ CP				Eletrodos	TCV45	TCV46	TCV47	TCV48	TCV49	TCV50	(Conclusão)
TCV 154 dias	Leitura 1	Tensão (V)			0,37	6,99	6,98	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99
		Corrente (mA)			127,5	0,792	0,812	0,783	0,78	0,781	0,81	0,81	0,81
	Leitura 2	Tensão (V)				6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,98	6,98
		Corrente (mA)				0,798	0,819	0,793	0,78	0,788	0,815	0,815	0,815
		Resistência média, $R = Tensão/Corrente$ (kΩ)			0,003	8,793	8,565	8,871	8,962	8,910	8,597	8,597	8,597
Resultado		Resistência do CP, $R_{CP} = R - R_{eletrodos}$ (kΩ)				8,790	8,563	8,868	8,959	8,907	8,594	8,594	8,594
		Resistividade do CP, $\rho_{CP}=R_{CP} A/L^*$ (Ωm)				346,8	332,0	356,8	356,1	357,7	359,8	359,8	359,8

NOTA – *área, A (mm²); comprimento, L (mm)

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 46 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO REV, POR TRAÇO

(Continua)

Amostra	CPs – RES e Dispersão (%) / Disp. < 10 % - Critério de Chauvenet: $r < r_{\text{crítico}}$									
TR	7 dias		28 dias		56 dias		91 dias		154 dias	
	53,5	0,69%	91,3	1,93%	102,3	0,83%	124,3	0,67%	-	-
	53,5	0,74%	85,7	4,35%	102,7	0,43%	131,7	5,27%	139,3	1,63%
	53,7	0,34%	91,0	1,64%	105,9	2,65%	129,9	3,82%	134,3	1,97%
	54,8	1,76%	89,2	0,38%	104,6	1,47%	124,0	0,91%	138,8	1,30%
	-	-	87,5	2,25%	103,4	0,30%	119,1	4,86%	135,7	0,96%
Nova Média Sd	53,89		89,56		103,13		125,14		137,05	
	$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$	
	0,64	1,534	2,60	1,732		1,732	4,82	1,732	2,39	1,534
	$r :$		$r :$		2,07		$r :$		$r :$	
	1,48		1,49		1,57		1,67		1,13	
TM	7 dias		28 dias		56 dias		91 dias		154 dias	
	99,3	1,36%	218,6	4,71%	377,3	1,39%	294,5	1,00%	270,7	5,87%
	94,2	3,79%	221,6	3,43%	-	-	307,6	5,48%	263,3	8,43%
	96,7	1,30%	-	-	366,6	1,49%	281,6	3,42%	310,6	8,01%
	103,2	5,36%	239,9	4,55%	359,0	3,53%	274,0	6,05%	297,6	3,50%
	96,4	1,58%	226,9	1,14%	385,6	3,62%	295,4	1,30%	301,9	4,98%
Nova Média Sd	97,9		240,3		-		296,5		281,2	
	$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$	
	3,07	1,732	10,16	1,645		1,534	11,94	1,732	18,71	1,732
	$r :$		$r :$		11,71		$r :$		$r :$	
	1,71		1,06		1,151		1,48		1,30	
TF	7 dias		28 dias		56 dias		91 dias		154 dias	
	41,0	2,00%	60,2	2,83%	74,4	3,60%	70,1	1,05%	76,8	4,65%
	41,3	1,32%	62,6	1,03%	73,9	4,17%	65,6	5,42%	77,1	4,27%
	43,5	3,89%	61,5	0,77%	79,7	3,30%	69,9	0,76%	79,4	1,43%
	43,1	2,96%	64,0	3,30%	76,9	0,29%	70,4	1,48%	83,0	3,05%
	39,8	4,91%	58,0	6,43%	78,8	2,14%	72,1	3,96%	86,5	7,30%
Nova Média Sd	42,5		65,5		79,2		68,1		-	
	$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$		$r_{\text{crit}} :$	
	1,4	1,732	2,70	1,732	2,51	1,732	2,24	1,732	4,12	1,645
	$r :$		$r :$		$r :$		$r :$		$r :$	
	1,12		1,48		1,28		1,68		1,43	

QUADRO 46 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO REV, POR TRAÇO

(Conclusão)

Amostra	CPs – RES e Dispersão (%) / Disp. < 10 % - Critério de Chauvenet: $r < r_{\text{crítico}}$									
TSCA	7 dias		28 dias		56 dias		91 dias		154 dias	
	52,1	6,37%	112,7	2,20%	209,6	0,03%	369,2	4,39%	410,5	4,18%
	54,5	2,07%	-	-	224,2	6,96%	336,4	4,89%	424,8	0,82%
	56,1	0,86%	113,8	1,29%	200,4	4,40%	343,3	2,94%	455,2	6,28%
	57,1	2,71%	119,1	3,35%	215,5	2,77%	368,8	4,28%	423,3	1,18%
	56,1	0,88%	115,6	0,29%	202,9	3,23%	345,5	2,33%	423,4	1,15%
Nova Média	57,9	4,00%	115,1	0,16%	205,3	2,07%	359,0	1,49%	432,8	1,05%
	55,63	$r_{\text{crit}} :$	115,24	$r_{\text{crit}} :$	209,67	$r_{\text{crit}} :$	353,70	$r_{\text{crit}} :$	428,34	$r_{\text{crit}} :$
	2,08	1,732	2,43	1,645	8,90	1,732	13,95	1,732	15,01	1,732
		$r :$		$r :$		$r :$		$r :$		$r :$
Sd		1,29		1,59		1,64		1,49		1,61
TCV	7 dias		28 dias		56 dias				154 dias	
	47,6	3,77%	76,4	0,12%	153,4	0,93%	-	-	-	-
	46,8	2,04%	77,5	1,23%	156,4	1,01%	-	-	-	-
	47,8	4,17%	78,1	2,03%	153,5	0,89%	-	-	356,8	0,23%
	45,1	1,72%	76,9	0,42%	155,1	0,13%	-	-	356,1	0,43%
	43,9	4,31%	78,3	2,26%	-	-	-	-	357,7	0,04%
Nova Média	44,0	3,96%	72,1	5,82%	155,9	0,68%	-	-	359,8	0,62%
	45,85	$r_{\text{crit}} :$	76,53	$r_{\text{crit}} :$	154,85	$r_{\text{crit}} :$	-		357,60	$r_{\text{crit}} :$
	1,75	1,732	2,29	1,732	1,35	1,645	-	-	1,63	1,732
		$r :$		$r :$		$r :$				$r :$
Sd		1,46		1,13		1,14		-		1,46

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 47 – TWO-WAY ANOVA REV: DADOS (1)

Tempo de cura (A)	Composição de aglomerantes (B)						T _i Bin
	TR	TM	TF	TSCA	TCV		
7	53,5 54,8	99,3 103	41,4 43,3	52,1 57,1	47,6 45,1		1664 28 59
	53,5 -	94,2 96,4	41,4 40,0	54,5 56,1	46,8 43,9		
	53,7 -	96,7 97,9	43,7 42,6	56,1 57,9	47,8 44,0		
28	91,3 89,2	219 240	60,2 64,0	113 120	76,4 76,9	275 6 45,85	3023 27 112
	85,7 87,5	222 227	62,6 58,0	- 116	77,5 78,3		
	91,0 92,6	- 240	61,5 65,5	114 116	78,1 -		
56	102 105	377 359	74,4 76,9	210 216	153 155	387 5 77	4450 25 178
	103 103	- 386	73,9 78,8	225 205	156 -		
	106 100	367 -	-	202 206	153 156		
91	124 124	295 274	70,1 70,4	369 369	- -	774 5 155	4905 22 223
	132 119	308 295	- 72,1	336 345	- -		
	130 122	282 297	69,9 -	343 359	- -		
154	139 139	271 298	76,8 83,0	410 423	- 356	0 0	6222 24 259
	136 136	263 302	77,1 86,5	425 423	- 358		
	134 -	311 281	79,4 -	- 433	357 360		
T _i A _{jn}	2671 26 102,72	6698 27 248,08	1614 25 64,55	6414 28 229,08	2.867 20 143,34	1430 4 358	ABn= 126 T= 20264 Y= 161

FONTE: O autor (2023).

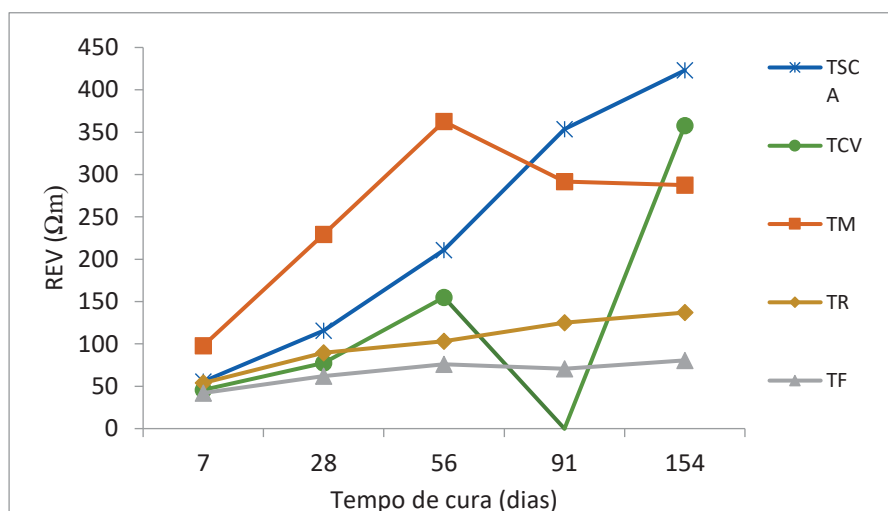
QUADRO 48 – TWO-WAY ANOVA REV (1)

TC = T... ² / ABn	3258914				
SQA = ∑(Ti.. ² / B.n) – TC	677015				
SQB = ∑(T.j. ² / A.n) – TC	661663				
SQAB = ∑(Tij. ² / nij) – TC – SQA - SQB	356428				
SQT = ∑(Yijk ²) – TC	1700452				
SQR = SQT-SQA-SQB-SQAB	5346				
Fonte de Variação	Somas dos Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F*	F tab*
Tempo de cura (A)	677014,8	4	169253,7	3197,51	2,46
Composição de aglomerantes (B)	661662,9	4	165415,7	3125,00	2,46
combinação dos efeitos A e B	356428,4	16	22276,8	420,85	1,74
Erro	5346,2	101	52,9		
Total	1700452,3	125			

NOTA – * $F_c > F_{tab}$, com 95% de confiabilidade, há distinção entre grupos em todos os casos!

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 78 – GRÁFICO DE FATORES: REV X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (1)



FONTE: O autor (2023).

Observa-se na Figura 78 que há uma possível incoerência na ordenada da série TM, na ordenada 56 – caso a ser confirmado pelo teste de Tukey. A depressão da série TCV é explicada pela ausência de dados na ordenada 91.

QUADRO 49 – LIMITE DE DECISÃO: RES X TEMPO DE CURA
E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	2,7
L.D = 3 x S_x	8,0

FONTE: O autor (2023).

TABELA 50 – TESTE DE TUKEY: REV DO TRAÇO TM

Tempo de cura	7	28	154	91	56
TM	97,9	229,5	287,5	291,6	362,6
Diferenças entre grupos		131,5	58,1	4,1	71,0
				< L.D	

FONTE: O autor (2023).

Observa-se na Tabela 50, que há distinção estatística entre o resultado de TM aos 56 dias e os demais grupos. Sendo assim, confirma-se a inconsistência observada na Figura 78, portanto, optou-se por eliminar os resultados de TM 56 como dados espúrios.

QUADRO 50 – TWO-WAY ANOVA REV: DADOS (2)

Composição de aglomerantes (B)										T _i	Bin	
Tempo de cura (A)	TR	TM	TF	TSCA	TCV							
7	53,5	54,8	99,3	103,2	41	43	52,1	57,1	47,6	45,1	1664 28 59	
	53,5	-	94,2	96,4	41	40	54,5	56,1	46,8	43,9		
	53,7	-	96,7	97,9	44	43	56,1	57,9	47,8	44,0		
28	91,3	89,2	219	240	60	64	113	120	76,4	76,9	3023 27 112	
	85,7	87,5	222	227	63	58	-	116	77,5	78,3		
	91,0	92,6	-	240	62	66	114	116	78,1	-		
56	102	105	-	-	74	77	210	216	153	155	2962 21 141	
	103	103	-	-	74	79	225	205	156	-		
	106	100	-	-	-	-	202	206	153	156		
91	124	124	295	274	70	70	369	369	-	-	4905 22 223	
	132	119	308	295	-	72	336	345	-	-		
	130	122	282	297	70	-	343	359	-	-		
154	-	139	271	298	77	83	410	423	-	356	6222 24 259	
	139	136	263	302	77	86	425	423	-	358		
	134	-	311	281	79	-	-	433	357	360		
T _j	2671	5210	1614	6414	2.867	20	143,34				ABn=	122
A _j n	26	23	25	28							T=	18775
	102,72	226,51	64,55	229,08							Y=	154

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 51 – TWO-WAY ANOVA REV (2)

TC = $T_{...}^2 / ABn$					2889480
SQA = $\sum(Ti..^2 / B.n) - TC$					672011
SQB = $\sum(T.j.^2 / A.n) - TC$					549476
SQAB = $\sum(Tij.^2 / nij) - TC - SQA - SQB$					289209
SQT = $\sum(Yijk^2) - TC$					1515630
SQR = SQT-SQA-SQB-SQAB					4935
Fonte de Variação	Somas dos Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F*	F tab*
Tempo de cura (A)	672010,8	4	168002,7	3302,35	2,47
Composição de aglomerantes (B)	549476,3	4	137369,1	2700,20	2,47
combinação dos efeitos A e B	289208,6	16	18075,5	355,30	1,75
Erro	4934,7	97	50,9		
Total	1515630,4	121			

NOTA: *Observações – $F_c > F_{tab}$, há distinção entre grupos em todos os casos!

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 52 – LIMITE DE DECISÃO: REV X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	2,7
$L.D = 3 \times S_x$	7,99

FONTE: O autor (2023).

TABELA 51 – TESTE DE TUKEY: REV X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

(Continua)					
Tempo de cura \ Traço	TF	TCV	TR	TSCA	TM
7 dias	42,1	45,9	53,9	55,6	97,9
Diferenças entre grupos	3,8	8,0	1,7	42,3	
	<L.D		<L.D		
	TF	TCV	TR	TSCA	TM
28 dias	62,0	77,4	89,6	115,8	229,5
Diferenças entre grupos	15,4	12,1	26,2	113,7	
	TF	TR	TCV	TSCA	TM
56 dias	77,1	103,1	154,8	210,8	-
Diferenças entre grupos	26,0	51,7	55,9		

TABELA 51 – TESTE DE TUKEY: REV X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

(Conclusão)					
Tempo de cura \ Traço	TF	TR	TM	TSCA	TCV
91 dias	69,4	125,1	291,6	353,7	-
Diferenças entre grupos	55,8	166,5	62,1		
	TF	TR	TM	TSCA	TCV
154 dias	80,6	137,1	287,5	423,0	616,2
Diferenças entre grupos	56,5	150,5	135,4	193,2	

FONTE: O autor (2023).

TABELA 52 – TESTE DE TUKEY: REV X TEMPO DE CURA

Traço \ Tempo de cura (dias)	7	28	56	91	154
TR	53,9	89,6	103,1	125,1	137,1
Diferenças entre grupos		35,7	13,6	22,0	11,9
	7	28	56	154	91
TM	97,9	229,5	287,5	291,6	97,9
Diferenças entre grupos		131,5	58,1	4,1	
	7	28	91	56	154
TF	42,1	62,0	70,6	76,0	80,6
Diferenças entre grupos		19,9	8,6	5,4	4,6
				<L.D	<L.D
	7	28	56	91	154
TSCA	55,6	115,8	210,8	353,7	423,0
Diferenças entre grupos		60,2	95,0	142,9	69,3
	7	28	56	154	91
TCV	45,9	77,4	154,8	357,6	-
Diferenças entre grupos		31,6	77,4	202,7	

FONTE: O autor (2023).

TABELA 53 – RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA

Tempo de cura	TR	TM	TF	TSCA	TCV
7	53,9	97,9	42,1	55,6	45,9
28	89,6	229	62,0	116	77,4
56	103		76,0	211	155
91	125	292	70,6	354	
154	137	288	80,6	423	358

FONTE: O autor (2023).

APÊNDICE 5 – RCPT E REV EXTRAÍDA DO RCPT

QUADRO 53 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS: LEITURAS

(Continua)

Amostra \ CP	Tempo (min)	TR7A	TR7B	TR8A	TR8B
TR 7 dias	0	0,12	0,12	0,12	0,12
	30	0,16	0,14	0,18	0,16
	60	0,19	0,17	0,21	0,18
	90	0,22	0,18	0,24	0,20
	120	0,24	0,20	0,26	0,22
	150	0,25	0,22	0,28	0,24
	180	0,27	0,23	0,30	0,25
	210	0,29	0,24	0,32	0,27
	240	0,30	0,25	0,35	0,28
	270	0,32	0,26	0,36	0,29
	300	0,33	0,27	0,38	0,30
	330	0,34	0,28	0,39	0,30
	360	0,34	0,28	0,39	0,31
Carga, Q (C)*		5652	4752	6345	5229
Média do traço (C)					5495
Sd					676
Co.V					12,30%
TR 28 dias		TR15A	TR15B	TR16A	TR16B
	0	0,06	0,07	0,06	0,07
	30	0,07	0,08	0,08	0,08
	60	0,08	0,09	0,08	0,09
	90	0,08	0,10	0,09	0,09
	120	0,09	0,10	0,10	0,10
	150	0,09	0,11	0,11	0,10
	180	0,10	0,11	0,11	0,10
	210	0,10	0,12	0,11	0,11
	240	0,10	0,12	0,12	0,11
	270	0,10	0,12	0,12	0,11
	300	0,10	0,12	0,12	0,12
	330	0,11	0,12	0,12	0,12
	360	0,11	0,12	0,13	0,12
Carga, Q (C)*		1989	2313	2259	2205
Média do traço (C)					2192
Sd					142
Co.V					6,48%

QUADRO 53 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS: LEITURAS

(Continuação)

Amostra \ CP	Tempo (min)	TR23A	TR23B	TR24A	TR24B
TR 56 dias	0	0,077	0,077	0,093	0,083
	30	0,083	0,083	0,102	0,091
	60	0,086	0,085	0,107	0,094
	90	0,091	0,090	0,112	0,099
	120	0,096	0,093	0,118	0,104
	150	0,099	0,097	0,124	0,108
	180	0,102	0,101	0,128	0,112
	210	0,106	0,104	0,131	0,115
	240	0,110	0,108	0,135	0,120
	270	0,113	0,110	0,139	0,123
	300	0,114	0,111	0,141	0,126
	330	0,116	0,114	0,145	0,128
	360	0,120	0,117	0,149	0,133
Carga, Q (C)*		2186,1	2147,4	2705,4	2390,4
Média do traço (C)					2357
Sd					255
Co.V					10,83%
TR 91 dias		TR36A	TR36B	TR37A	TR37B
	0	0,066	0,071	0,061	0,067
	30	0,071	0,076	0,064	0,073
	60	0,075	0,079	0,068	0,075
	90	0,078	0,084	0,072	0,079
	120	0,080	0,086	0,074	0,082
	150	0,081	0,089	0,076	0,084
	180	0,082	0,090	0,076	0,084
	210	0,084	0,092	0,078	0,086
	240	0,086	0,094	0,079	0,086
	270	0,086	0,095	0,080	0,088
	300	0,087	0,096	0,081	0,090
	330	0,087	0,097	0,082	0,090
	360	0,087	0,099	0,082	0,092
Carga, Q (C)*		1752,3	1913,4	1622,7	1793,7
Média do traço (C)					1771
Sd					120
Co.V					6,77%

QUADRO 53 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS: LEITURAS

(Continuação)

Amostra \ CP	Tempo (min)	TR43A	TR43B	TR44A	TR44B
TR 154 dias		0,0579	0,0542	0,0583	0,0581
	0	0,0627	0,0582	0,0636	0,0630
	30	0,0657	0,0606	0,0666	0,0657
	60	0,0680	0,0624	0,0692	0,0681
	90	0,0697	0,0639	0,0710	0,0696
	120	0,0715	0,0651	0,0727	0,0711
	150	0,0728	0,0662	0,0740	0,0717
	180	0,0736	0,0665	0,0746	0,0722
	210	0,0740	0,0670	0,0751	0,0727
	240	0,0747	0,0674	0,0755	0,0726
	270	0,0749	0,0675	0,0758	0,0724
	300	0,0741	0,0672	0,0756	0,0719
	330	0,0741	0,0671	0,0756	0,0719
	360	1525,86	1390,77	1549,17	1504,8
Carga, Q (C)* Média do traço (C) Sd Co.V		TR43A	TR43B	TR44A	TR44B
					1493
					70
					4,71%
TM 7 dias		TM7A	TM7B	TM8A	TM8B
	0	0,07	0,06	0,07	0,07
	30	0,09	0,08	0,08	0,08
	60	0,09	0,08	0,08	0,08
	90	0,10	0,09	0,09	0,09
	120	0,11	0,10	0,09	0,09
	150	0,11	0,10	0,10	0,10
	180	0,11	0,11	0,10	0,10
	210	0,12	0,11	0,10	0,10
	240	0,12	0,11	0,10	0,10
	270	0,12	0,11	0,11	0,10
	300	0,12	0,11	0,11	0,10
	330	0,12	0,11	0,11	0,10
	360	0,12	0,11	0,11	0,10
Carga, Q (C)* Média do traço (C) Sd Co.V		2349	2151	2088	2025
					2153
					140
					6,51%

QUADRO 53 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS: LEITURAS

(Continuação)

Amostra \ CP	Tempo (min)	TM15A	TM15B	TM16A	TM16B
TM 28 dias	0	0,03	0,03	0,03	0,03
	30	0,03	0,03	0,04	0,03
	60	0,03	0,03	0,04	0,03
	90	0,03	0,03	0,04	0,04
	120	0,03	0,03	0,04	0,04
	150	0,04	0,03	0,04	0,04
	180	0,04	0,03	0,04	0,04
	210	0,04	0,03	0,04	0,04
	240	0,04	0,03	0,05	0,04
	270	0,04	0,03	0,05	0,04
	300	0,04	0,03	0,05	0,04
	330	0,04	0,03	0,05	0,04
	360	0,04	0,03	0,05	0,04
	Carga, Q (C)*	783	648	936	819
	Média do traço (C)				797
Sd Co.V					119
					14,89%
TM 56 dias		TM23A	TM23B	TM24A	TM24B
	0	0,022	0,022	0,030	0,030
	30	0,024	0,023	0,040	0,030
	60	0,023	0,022	0,040	0,030
	90	0,023	0,023	0,040	0,040
	120	0,024	0,022	0,040	0,040
	150	0,024	0,023	0,040	0,040
	180	0,024	0,023	0,040	0,040
	210	0,025	0,023	0,040	0,040
	240	0,025	0,024	0,050	0,040
	270	0,026	0,026	0,050	0,040
	300	0,028	0,027	0,050	0,040
	330	0,027	0,026	0,050	0,040
	360	0,027	0,026	0,050	0,040
	Carga, Q (C)*	535,5	514,8	936	819
Média do traço (C) Sd Co.V					701
					209
					29,82%

QUADRO 53 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS: LEITURAS

(Continuação)

Amostra \ CP	Tempo (min)	TM36A	TM36B	TM37A	TM37B
TM 91 dias	0	0,0296	0,0271	0,0267	0,0245
	30	0,0300	0,0276	0,0274	0,0249
	60	0,0308	0,0282	0,0276	0,0251
	90	0,0311	0,0288	0,0281	0,0254
	120	0,0321	0,0293	0,0287	0,0258
	150	0,0326	0,0301	0,0296	0,0264
	180	0,0335	0,0305	0,0299	0,0269
	210	0,0343	0,0317	0,0308	0,0275
	240	0,0353	0,0323	0,0313	0,0279
	270	0,0362	0,0330	0,0319	0,0285
	300	0,0374	0,0339	0,0326	0,0290
	330	0,0382	0,0347	0,0333	0,0299
	360	0,0392	0,0351	0,0338	0,0303
	Carga, Q (C)*	730,62	668,16	650,61	584,46
	Média do traço (C)				658
	Sd				60
	Co.V				9,13%
TM 154 dias		TM43A	TM43B	TM44A	TM44B
	0	0,0261	0,0263	0,0284	0,0297
	30	0,0285	0,0326	0,0332	0,0351
	60	0,0292	0,0321	0,0328	0,0323
	90	0,0304	0,0328	0,0332	0,0331
	120	0,0294	0,0343	0,034	0,0357
	150	0,0287	0,0336	0,0341	0,0363
	180	0,0294	0,0337	0,0342	0,0371
	210	0,0302	0,0335	0,0344	0,0362
	240	0,0309	0,0337	0,0345	0,034
	270	0,0317	0,0342	0,0348	0,0313
	300	0,0322	0,0345	0,0355	0,0312
	330	0,0327	0,0346	0,036	0,0315
	360	0,0328	0,0348	0,0362	0,0318
	Carga, Q (C)*	652,95	720,27	736,2	728,19
	Média do traço (C)				709
	Sd				38
	Co.V				5,38%

QUADRO 53 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS: LEITURAS

(Continuação)

Amostra \ CP	Tempo (min)	TF7A	TF7B	TF8A	TF8B
TF 7 dias	0	0,13	0,14	0,13	0,13
	30	0,18	0,19	0,16	0,17
	60	0,20	0,21	0,19	0,19
	90	0,23	0,24	0,21	0,21
	120	0,20	0,26	0,23	0,23
	150	0,27	0,29	0,25	0,25
	180	0,29	0,31	0,25	0,26
	210	0,31	0,33	0,27	0,28
	240	0,32	0,34	0,29	0,29
	270	0,34	0,36	0,31	0,30
	300	0,36	0,37	0,32	0,31
	330	0,37	0,39	0,34	0,32
	360	0,37	0,39	0,35	0,32
	Carga, Q (C)*	5976	6399	5508	5463
	Média do traço (C)				5837
Carga, Q (C)* Média do traço (C) Sd Co.V	Sd				441
	Co.V				7,55%
TF 28 dias		TR7A	TR7B	TR8A	TR8B
	0	TF15A	TF15B	TF16A	TF16B
	30	0,11	0,11	0,10	0,11
	60	0,13	0,13	0,13	0,14
	90	0,15	0,14	0,14	0,15
	120	0,16	0,15	0,15	0,16
	150	0,16	0,17	0,17	0,17
	180	0,17	0,17	0,17	0,18
	210	0,18	0,18	0,18	0,18
	240	0,18	0,19	0,19	0,19
	270	0,19	0,19	0,19	0,20
	300	0,19	0,20	0,20	0,20
	330	0,19	0,20	0,20	0,20
	360	0,20	0,21	0,21	0,21
	Carga, Q (C)*	0,20	0,21	0,21	0,21
Carga, Q (C)* Média do traço (C) Sd Co.V	Média do traço (C)				3767
	Sd				63
	Co.V				1,68%

QUADRO 53 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS: LEITURAS

(Continuação)

Amostra \ CP	Tempo (min)	TF23A	TF23B	TF24A	TF24B
TF 56 dias	0	0,101	0,103	0,104	0,100
	30	0,114	0,113	0,118	0,111
	60	0,120	0,121	0,126	0,119
	90	0,128	0,129	0,137	0,127
	120	0,134	0,135	0,143	0,133
	150	0,137	0,139	0,147	0,136
	180	0,140	0,141	0,152	0,140
	210	0,143	0,144	0,156	0,143
	240	0,114	0,148	0,160	0,147
	270	0,149	0,150	0,163	0,148
	300	0,150	0,153	0,167	0,151
	330	0,150	0,154	0,169	0,153
	360	0,152	0,154	0,172	0,154
Carga, Q (C)* Média do traço (C) Sd Co.V		2889,9	2979,9	3196,8	2943
					3002
					135
					4,49%
TF 91 dias		TF36A	TF36B	TF37A	TF37B
	0	0,1199	0,1183	0,1303	0,1366
	30	0,1518	0,1417	0,1297	0,1323
	60	0,1637	0,1568	0,1389	0,1413
	90	0,1718	0,1642	0,1456	0,1486
	120	0,1793	0,1713	0,1521	0,155
	150	0,185	0,1756	0,1565	0,1598
	180	0,1904	0,1791	0,1608	0,1648
	210	0,194	0,1828	0,1636	0,1679
	240	0,1974	0,1845	0,1663	0,1717
	270	0,1988	0,1875	0,1687	0,1745
	300	0,1994	0,1875	0,1688	0,1752
	330	0,1998	0,1846	0,1704	0,1767
	360	0,1997	0,1891	0,1707	0,1778
Carga, Q (C)* Média do traço (C) Sd Co.V		3944,16	3724,74	3369,42	3465
					3626
					260
					7,17%

QUADRO 53 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS: LEITURAS

(Continuação)

Amostra \ CP	Tempo (min)	TF43A	TF43B	TF44A	TF44B
TF 154 dias	0	0,0987	0,0904	0,0904	0,0857
	30	0,1075	0,0978	0,0986	0,0922
	60	0,1146	0,1037	0,1037	0,0973
	90	0,1193	0,108	0,1077	0,1014
	120	0,1245	0,119	0,1109	0,1055
	150	0,1292	0,1159	0,113	0,1097
	180	0,1335	0,1193	0,1165	0,1131
	210	0,1368	0,1222	0,119	0,1168
	240	0,1402	0,1246	0,1223	0,1187
	270	0,1423	0,1263	0,123	0,1197
	300	0,1437	0,1278	0,1242	0,1214
	330	0,1458	0,1291	0,1265	0,1231
	360	0,1458	0,1293	0,127	0,1239
		2807,37	2526,39	2473,38	2382,66
Média do traço (C)					2547
Sd					183
Co.V					7,19%
TSCA 7 dias		TSCA7A	TSCA7B	TSCA8A	TSCA8B
	0	0,10	0,10	0,11	0,10
	30	0,12	0,12	0,13	0,11
	60	0,13	0,13	0,15	0,12
	90	0,15	0,14	0,17	0,13
	120	0,16	0,16	0,18	0,14
	150	0,18	0,17	0,20	0,15
	180	0,19	0,18	0,21	0,16
	210	0,20	0,19	0,23	0,17
	240	0,21	0,20	0,24	0,18
	270	0,21	0,21	0,25	0,18
	300	0,22	0,21	0,26	0,19
	330	0,22	0,22	0,28	0,20
	360	0,23	0,23	0,28	0,20
Carga, Q (C)*		3879	3771	4491	3384
Média do traço (C)					3881
Sd					459
Co.V					11,82%

QUADRO 53 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS: LEITURAS

(Continuação)

Amostra \ CP	Tempo (min)	TSCA15A	TSCA15B	TSCA16A	TSCA16B
TSCA 28 dias	0	0,06	0,06	0,06	0,06
	30	0,07	0,07	0,08	0,07
	60	0,07	0,07	0,08	0,08
	90	0,08	0,07	0,08	0,08
	120	0,08	0,08	0,08	0,09
	150	0,08	0,08	0,08	0,09
	180	0,09	0,08	0,08	0,09
	210	0,09	0,09	0,09	0,09
	240	0,09	0,09	0,09	0,09
	270	0,10	0,09	0,09	0,09
	300	0,10	0,09	0,09	0,09
	330	0,10	0,09	0,09	0,09
	360	0,10	0,09	0,09	0,09
	Carga, Q (C)*	1854	1755	1809	1845
	Média do traço (C)				1816
Carga, Q (C)* Média do traço (C) Sd Co.V	Sd				45
	Co.V				2,47%
TSCA 56 dias		TSCA23A	TSCA23B	TSCA24A	TSCA24B
	0	0,034	0,034	0,035	0,036
	30	0,035	0,035	0,036	0,036
	60	0,035	0,036	0,036	0,037
	90	0,036	0,036	0,037	0,039
	120	0,037	0,037	0,038	0,039
	150	0,037	0,037	0,038	0,039
	180	0,038	0,038	0,039	0,041
	210	0,040	0,039	0,040	0,042
	240	0,039	0,039	0,040	0,041
	270	0,040	0,039	0,040	0,042
	300	0,042	0,041	0,043	0,044
	330	0,041	0,041	0,042	0,043
	360	0,041	0,041	0,041	0,044
	Carga, Q (C)*	823,5	819,9	840,6	869,4
Carga, Q (C)* Média do traço (C) Sd Co.V	Média do traço (C)				838
	Sd				23
	Co.V				2,69%

QUADRO 53 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS: LEITURAS

(Continuação)

Amostra \ CP	Tempo (min)	TSCA36A	TSCA36B	TSCA37A	TSCA37B
TSCA 91 dias	0	0,01733	0,01861	0,01914	0,01745
	30	0,01748	0,01890	0,01945	0,01760
	60	0,01775	0,01613	0,01977	0,01855
	90	0,01797	0,01931	0,01990	0,01913
	120	0,01817	0,01950	0,02010	0,01939
	150	0,01842	0,01977	0,02040	0,01962
	180	0,01866	0,01990	0,02060	0,01990
	210	0,01886	0,02020	0,02090	0,02010
	240	0,01926	0,02060	0,02130	0,02050
	270	0,01964	0,02100	0,02170	0,02090
	300	0,02000	0,02150	0,02220	0,02140
	330	0,02040	0,02190	0,02260	0,02190
	360	0,02070	0,02230	0,02300	0,02230
	Carga, Q (C)*	406,125	430,497	449,982	429,957
	Média do traço (C)				429
Carga, Q (C)* Média do traço (C) Sd Co.V	Sd				18
	Co.V				4,18%
TSCA 154 dias		TSCA43A	TSCA43B	TSCA44A	TSCA44B
	0	0,01253	0,01242	0,01239	0,01276
	30	0,01303	0,01326	0,01280	0,01342
	60	0,01343	0,01409	0,01353	0,01402
	90	0,01330	0,01420	0,01360	0,01410
	120	0,01376	0,01527	0,01481	0,01484
	150	0,01400	0,01601	0,01520	0,01533
	180	0,01424	0,01674	0,01559	0,01582
	210	0,01448	0,01748	0,01598	0,01631
	240	0,01475	0,01800	0,01633	0,01662
	270	0,01451	0,01790	0,01642	0,01672
	300	0,01442	0,01816	0,01728	0,01694
	330	0,01445	0,01834	0,01780	0,01717
	360	0,01444	0,01848	0,01806	0,01721
	Carga, Q (C)*	302,139	350,82	332,217	335,295
Carga, Q (C)* Média do traço (C) Sd Co.V	Média do traço (C)				330
	Sd				20
	Co.V				6,17%

QUADRO 53 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS: LEITURAS

(Continuação)

Amostra \ CP	Tempo (min)	TCV7A	TCV7B	TCV8A	TCV8B
TCV 7 dias	0	0,14	0,14	0,14	0,14
	30	0,18	0,18	0,18	0,18
	60	0,20	0,21	0,20	0,20
	90	0,20	0,21	0,22	0,21
	120	0,21	0,22	0,23	0,23
	150	0,23	0,23	0,25	0,25
	180	0,23	0,26	0,26	0,25
	210	0,25	0,27	0,27	0,27
	240	0,25	0,28	0,28	0,27
	270	0,25	0,29	0,29	0,28
	300	0,26	0,30	0,30	0,28
	330	0,26	0,30	0,30	0,28
	360	0,27	0,30	0,30	0,28
	Carga, Q (C)*	4905	5346	5400	5238
	Média do traço (C)				5222
Carga, Q (C)* Média do traço (C) Sd Co.V	Sd				222
	Co.V				4,25%
TCV 28 dias		TCV15A	TCV15B	TCV16A	TCV16B
	0	0,08	0,08	0,08	0,08
	30	0,10	0,10	0,10	0,10
	60	0,11	0,11	0,11	0,11
	90	0,12	0,12	0,12	0,12
	120	0,13	0,12	0,12	0,13
	150	0,13	0,13	0,13	0,13
	180	0,14	0,14	0,14	0,14
	210	0,15	0,14	0,14	0,14
	240	0,15	0,15	0,15	0,15
	270	0,16	0,15	0,15	0,15
	300	0,16	0,16	0,16	0,16
	330	0,17	0,16	0,16	0,16
	360	0,17	0,16	0,16	0,16
	Carga, Q (C)*	2961	2880	2880	2898
Carga, Q (C)* Média do traço (C) Sd Co.V	Média do traço (C)				2905
	Sd				38
	Co.V				1,32%

QUADRO 53 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS: LEITURAS

(Conclusão)

Amostra \ CP	Tempo (min)	TCV23A	TCV23B	TCV24A	TCV24B
TCV 56 dias	0	0,050	0,055	0,055	0,051
	30	0,052	0,059	0,059	0,056
	60	0,051	0,062	0,059	0,058
	90	0,056	0,064	0,061	0,059
	120	0,057	0,065	0,062	0,060
	150	0,059	0,067	0,065	0,060
	180	0,060	0,068	0,066	0,061
	210	0,061	0,071	0,068	0,061
	240	0,065	0,071	0,069	0,062
	270	0,064	0,073	0,070	0,064
	300	0,064	0,074	0,071	0,064
	330	0,066	0,076	0,073	0,066
	360	0,066	0,076	0,073	0,066
Carga, Q (C)*		1283,4	1467,9	1416,6	1313,1
Média do traço (C)					1370
Sd					87
Co.V					6,32%
Amostra \ CP	Tempo (min)	TCV43A	TCV43B	TCV44A	TCV44B
TCV 154 dias	0	0,0216	0,0198	0,0221	0,0216
	30	0,0225	0,0207	0,0236	0,0235
	60	0,0229	0,0212	0,0244	0,0246
	90	0,0233	0,0216	0,0250	0,0259
	120	0,0238	0,0220	0,0256	0,0263
	150	0,0244	0,0219	0,0264	0,0269
	180	0,0249	0,0223	0,0273	0,0276
	210	0,0251	0,0232	0,0276	0,0278
	240	0,0253	0,0240	0,0280	0,0280
	270	0,0253	0,0240	0,0290	0,0287
	300	0,0252	0,0236	0,0298	0,0296
	330	0,0252	0,0236	0,0301	0,0300
	360	0,0250	0,0232	0,0298	0,0294
Carga, Q (C)*		524,16	485,244	580,95	583,92
Média do traço (C)					544
Sd					48
Co.V					8,76%

NOTA: $Q = 900(I_{0+2I_{30}+2I_{60}+ \dots +2I_{300}+2I_{330}+I_{360})$

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 54 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS APÓS ELIMINAÇÃO DE ELEMENTOS ESPÚRIOS

Carga total (C) – média – Co.V < 12 %										
Idade \ Traços	TR		TM		TF		TSCA		TCV	
7 dias	5652	-	2349	2151	5976	6399	3879	3771	4905	5346
	-	5229	2088	2025	5508	5463	4491	3384	5400	5238
Média e Co.V	5441	5,5%	2153	6,51%	5837	7,55%	3881	11,82%	5222	4,25%
28 dias	1989	2313	783	648	3699	3762	1854	1755	2961	2880
	2259	2205	-	819	3753	3852	1809	1845	2880	2898
Média e Co.V	2192	6,48%	846	9,46%	3767	1,68%	1816	2,47%	2905	1,32%
56 dias	2186	2147	-	-	2890	3780	824	820	1283	1468
	2705	2390	-	819	3197	2943	841	869	1417	1313
Média e Co.V	2357	10,83%	819	-	3002	4,49%	838	2,69%	1370	6,32%
91 dias	1752	1913	730	668	3944	3725	406	431	-	-
	1623	1794	651	585	3369	3468	450	430	-	-
Média e Co.V	1771	6,77%	658	9,13%	3626	7,17%	430	4,18%	-	-
154 dias	1526	1391	653	720	2807	2526	302	351	524	485
	1549	1505	736	728	2473	2383	332	335	581	584
Média e Co.V	1493	4,71%	709	5,38%	2547	7,19%	330	6,17%	544	8,76%

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 55 – TWO-WAY ANOVA RCPT: DADOS (1)

Composição de aglomerantes (B)							
Tempo de cura (A)	TR	TM	TF	TSCA	TCV	T _i	Ain
7	5652	2349 2151	5976 6399	3879 3771	4905 5346	79254	18 4403
	5229	2088 2025	5508 5463	4491 3384	5400 5238		
28	1989 2313	783	3699 3762	1821 1755	2961 2880	45219	19 2380
	2259 2205	936 819	3753 3852	1809 1845	2880 2898		
56	2186 2147		2890 2980	824 820	1283 1468	31092	17 1829
	2705 2390	819	3197 2943	841 869	1417 1313		
91	1752 1913	730 668	3944 3725	406 431		25939	16 1621
	1623 1794	651 585	3369 3468	450 430			
154	1526 1391	653 720	2807 2526	302 351	524 485	22491	20 1125
	1549 1505	736 728	2473 2383	332 335	581 584		
T _j						ABn=	90
Bin						T=	203995
						Y=	2267

FONTE: O autor (2023).

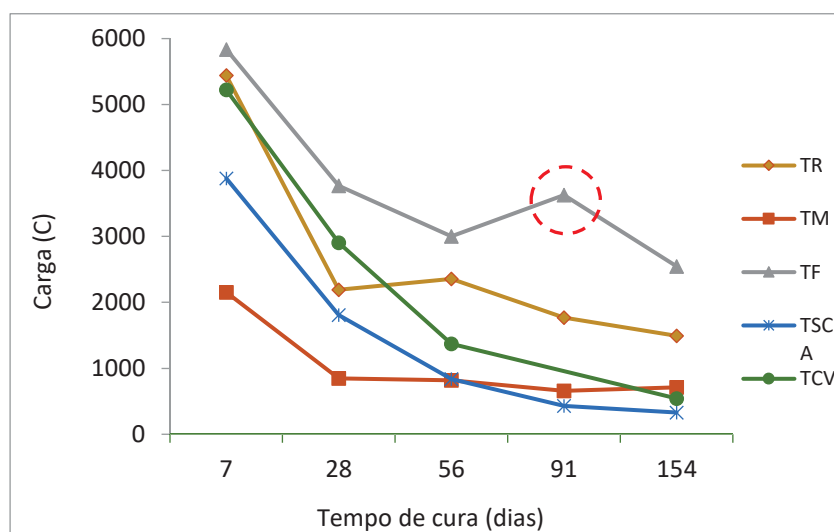
QUADRO 56 – TWO-WAY ANOVA RCPT (1)

TC = T... ² / ABn	462377334				
SQA = ∑(Ti.. ² / B.n) – TC	118406544				
SQB = ∑(T.j. ² / A.n) – TC	80652001				
SQAB = ∑(Tij. ² / nij) – TC – SQA - SQB	22221405				
SQT = ∑(Yijk ²) – TC	223543249				
SQR = SQT-SQA-SQB-SQAB	2263299				
Fonte de Variação	Somas dos Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F*	F tab*
Tempo de cura (A)	118406544,1	4	29601636,0	850,13	2,51
Composição de aglomerantes (B)	80652000,8	4	20163000,2	579,06	2,51
combinação dos efeitos A e B	22221405,2	16	1388837,8	39,89	1,80
Erro	2263299,3	65	34820,0		
Total	223543249,4	89			

NOTA – *Fc > Ftab, com 95% de confiabilidade, há distinção entre grupos em todos os casos!

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 79 – GRÁFICO DE FATORES: RCPT X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (1)



FONTE: O autor (2023).

De acordo com a Figura 79 há uma possível incoerência no resultado da amostra TF, aos 91 dias.

QUADRO 57 – LIMITE DE DECISÃO: RCPT X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (1)

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	81,1
$L.D = 3 \times S_x$	243,3

FONTE: O autor (2023).

TABELA 54 – TESTE DE TUKEY: RCPT, AO CASO DO TRAÇO TF

Tempo de cura	7	28	91	56	154
TF	5837	3767	3627	3003	2547
Diferenças entre grupos		2070	140	624	455
			<L.D		

FONTE: O autor (2023).

Identifica-se na Tabela 54, que o resultado de TM91 é estatisticamente distinto, maior do que o de TM56. Isso confirma o pico observado na Figura 79, o qual caracteriza uma incoerência de resultado. Portanto, optou-se por classificar o grupo de dados do grupo TF 91 como de elementos espúrios.

QUADRO 58 – TWO-WAY ANOVA RCPT: DADOS (2)

Composição de aglomerantes (B)							T _i	Ain
Tempo de cura (A)	TR	TM	TF	TSCA	TCV			
7	5652	2349 2151	5976 6399	3879 3771	4905 5346	4 5222 20889	79254	18 4403
	5229	2088 2025	5508 5463	4491 3384	5400 5238			
28	1989 2313	783	3699 3762	1821 1755	2961 2880	4 2905 11619	45219	19 2380
	2259 2205	936 819	3753 3852	1809 1845	2880 2898			
56	2186 2147	819	2890 2980	824 820	1283 1468	4 1370 5481	31092	17 1829
	2705 2390		3197 2943	841 869	1417 1313			
91	1752 1913	730 668		406 431			11433	12 953
	1623 1794	651 585		450 430				
154	1526 1391	653 720	2807 2526	302 351	524 485	4 544 2174	22491	20 1125
	1549 1505	736 728	2473 2383	332 335	581 584			
T _j Bin	42128	17441	60611	29146	40163		ABn=	86
	18	16	16	20	16		T=	189489
	2340	1090	3788	1457	2510		Y=	2203

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 59 – TWO-WAY ANOVA RCPT (2)

TC = T... ² / ABn	417512571				
SQA = ∑(Ti.. ² / B.n) – TC	132112115				
SQB = ∑(T.j. ² / A.n) – TC	72994411				
SQAB = ∑(Tij. ² / nij) – TC – SQA - SQB	8432177				
SQT = ∑(Yijk ²) – TC	215600066				
SQR = SQT-SQA-SQB-SQAB	2061362				
Fonte de Variação	Somas dos Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F*	F tab*
Tempo de cura (A)	132112114,7	4	33028028,7	977,37	2,52
Composição de aglomerantes (B)	72994411,4	4	18248602,8	540,01	2,52
Combinação dos efeitos A e B	8432177,5	16	527011,1	15,60	1,81
Erro	2061362,3	61	33792,8		
Total	215600065,8	85			

NOTA – *Fc > Ftab, com 95% de confiabilidade, há distinção entre grupos em todos os casos!

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 60 – LIMITE DE DECISÃO: RCPT X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (2)

$Sx = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	81,7
$L.D = 3 \times Sx$	245,2

FONTE: O autor (2023).

TABELA 55 – TESTE DE TUKEY: RCPT X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

Continua					
Tempo de cura \ Traço	TF	TR	TCV	TSCA	TM
7 dias	5837	5441	5222	3881	2153
Diferenças entre grupos	396	218	1341	1728	
		<L.D			
	TF	TCV	TR	TSCA	TM
28 dias	3767	2905	2192	1808	846
Diferenças entre grupos	862	713	384	962	
	TF	TR	TCV	TSCA	TM
56 dias	3003	2357	1370	839	819
Diferenças entre grupos	646	987	532	20	
				<L.D	

TABELA 55 – TESTE DE TUKEY: RCPT X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

					Conclusão
Tempo de cura \ Traço	TR	TM	TSCA		
91 dias	1771	659	429		
Diferenças entre grupos	1112	229			
		<L.D			
	TF	TR	TM	TCV	TSCA
154 dias	2547	1493	709	544	330
Diferenças entre grupos	1055	784	166	214	
			<L.D	<L.D	

FONTE: O autor (2023).

TABELA 56 – TESTE DE TUKEY: RCPT X TEMPO DE CURA

Traço \ Tempo de cura (dias)	7	56	28	91	154
TR	5441	2357	2192	1771	1493
Diferenças entre grupos		3084	166	421	278
			<L.D		
Traço \ Tempo de cura (dias)	7	28	56	154	91
TM	2153	846	819	709	659
Diferenças entre grupos		1307	27	110	51
			<L.D	137	188
				<L.D	<L.D
Traço \ Tempo de cura (dias)	7	28	56	154	
TF	5837	3767	3003	2547	
Diferenças entre grupos		2070	764	455	
Traço \ Tempo de cura (dias)	7	28	56	91	154
TSCA	3881	1808	839	429	330
Diferenças entre grupos		2074	969	409	99
					< L.D
Traço \ Tempo de cura (dias)	7	28	56	154	
TCV	5222	2905	1370	544	
Diferenças entre grupos		2318	1535	827	

FONTE: O autor (2023).

TABELA 57 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Tempo de cura	TR	TM	TF	TSCA	TCV
7	5441	2153	5837	3881	5222
28	2192	846	3767	1808	2905
56	2357	819	3003	839	1370
91	1771	659	-	429	-
154	1493	709	2547	330	544

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 61 – REV A PARTIR DO RCPT, APÓS ELIMINAÇÃO DE ELEMENTOS ESPÚRIOS

REV (Ωm) – média – Co.V < 12 %										
Idade \ Traços	TR		TM		TF		TSCA		TCV	
7 dias	39,9	-	-	98,9	37,9	-	56,3	57,7	43,2	40,4
	-	42,4	100	103	40,3	40,3	-	-	40,0	41,0
Média e Co.V	41	4,22%	100	1,89%	39,5	3,6%	57,0	1,63%	41,1	3,46%
28 dias	-	91,4	266	-	57,1	56,5	113	119	72,5	74,2
	95,0	95,2	-	254	57,2	55,0	115	113	74,2	73,7
Média e Co.V	96,9	6,51%	260	3,29%	56,5	1,74%	115	2,28%	73,6	1,05%
56 dias	95,0	96,5	382	397	71,9	69,7	249	249	160	-
	-	-	-	-	65,4	70,7	244	235	-	156
Média e Co.V	95,8	1,12%	390	2,70%	69,4	4,05%	244	2,65%	158	1,86%
91 dias	117	-	-	307	-	-	502	475	-	-
	-	115	315	-	61,1	59,4	453	476	-	-
Média e Co.V	116	1,65%	311	1,79%	60,3	2,02%	477	4,2%	-	-
154 dias	133	-	-	278	-	80,5	-	604	-	-
	126	129	-	274	80,3	83,5	626	618	364	366
Média e Co.V	129	2,93%	276	1,01%	81,4	2,22%	616	1,84%	365,3	0,45%

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 62 – TWO-WAY ANOVA REV
EXTRAÍDA DO RCPT: DADOS (1)

Composição de aglomerantes (B)							T _j	A _{in}
Tempo de cura (A)	TR	TM	TF	TSCA	TCV			
7	39,9	98,9	37,9	56,3	57,7	43,2	781	14
	42,4	100	40,3	57,0	114	40,0		
28	91,4	266	57,1	113	119	72,5	1781	17
	95,0	254	57,2	115	113	74,2		
56	95,0	382	71,9	249	249	160	2542	14
	96,5	397	69,7	244	235	156		
91	117	307	61,1	502	475		2881	10
	115	315	59,4	453	476			
154	133	278	80,5	604	604	364	3763	13
	126	274	83,5	626	618	366		
T _j Bin	1176	2773	987	5306	1848	1506	ABn=	68
	12	11	16	17		12		
	98,0	252	61,7	312		126	Y=	173

FONTE: O autor (2023).

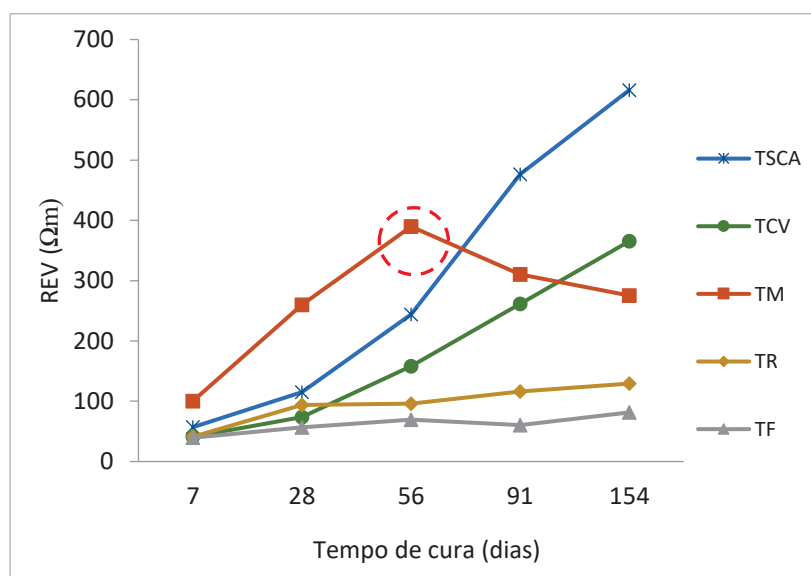
QUADRO 63 – TWO-WAY ANOVA REV EXTRAÍDA DO RCPT (1)

TC = T... ² / ABn	2029575				
SQA = ∑(Ti.. ² / B.n) – TC	581296				
SQB = ∑(T.j. ² / A.n) – TC	690620				
SQAB = ∑(Tij. ² / nij) – TC – SQA - SQB	393059				
SQT = ∑(Yijk ²) – TC	1666916				
SQR = SQT-SQA-SQB-SQAB	1941				
Fonte de Variação	Somas dos Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F*	F tab*
Tempo de cura (A)	581296,0	4	145324,0	3219,22	2,59
Composição de aglomerantes (B)	690620,4	4	172655,1	3824,66	2,59
combinação dos efeitos A e B	393058,6	16	24566,2	544,19	1,89
Erro	1941,1	43	45,1		
Total	1666916,1	67			

NOTA – *Fc > Ftab, com 95% de confiabilidade, há distinção entre grupos em todos os casos!

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 80 – GRÁFICO DE FATORES: REV EXTRAÍDA DO RCPT X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (1)



FONTE: O autor (2023).

Observa-se na Figura 80 que há uma possível incoerência na ordenada da série TM, na abscissa 56.

QUADRO 64 – LIMITE DE DECISÃO: REV EXTRAÍDA DO RCPT X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (1)

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	3,4
$L.D = 3 \times S_x$	10,1

FONTE: O autor (2023).

TABELA 58 – TESTE DE TUKEY: REV EXTRAÍDA DO RCPT, AO CASO DO TRAÇO TM

Tempo de cura	7	28	154	91	56
TM	100	260	276	311	390
Diferenças entre grupos		159	16	35	79

FONTE: O autor (2023).

A Tabela 58 indica que há diferença estatística no pico observado no grupo TM56, na Figura 80, o que confirma a incoerência dos dados desse grupo. Por essa razão esse grupo foi classificado como de elementos espúrios, sendo excluídos das próximas análises.

QUADRO 65 - TWO- WAY ANOVA REV EXTRAÍDA DO RCPT: DADOS (2)

Composição de aglomerantes (B)							T _i	Ain
Tempo de cura (A)	TR	TM	TF	TSCA	TCV			
7	39,9	98,90	37,9	56,3	43,2	781	14	56
	42,4	100	40,3	57,7	40,0	2	57	4
28	91,4	224	57,1	113	72,5	1739	17	102
	95,0	254	57,2	115	74,2	4	115	4
56	96,5		69,7	249	160	1763	12	147
			70,7	244	156	4	244	2
91	117	307	61,1	502		2847	10	285
	115	281	59,4	453		4	477	4
154	133	278	80,5	604		3791	13	292
	126	302	83,5	626	364	3	616	2
T _j	1176	1945	987	5306		ABn=		66
Bin	12	9	16	17		T=		10920
	98,0	216	61,7	312		Y=		165

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 66 – TWO-WAY ANOVA REV EXTRAÍDA DO RCPT (2)

TC = T... ² / ABn	1806855
SQA = ∑(Ti.. ² / B.n) – TC	589496
SQB = ∑(T.j. ² / A.n) – TC	634836
SQAB = ∑(Tij. ² / nij) – TC – SQA - SQB	333910
SQT = ∑(Yijk ²) – TC	1561055
SQR = SQT-SQA-SQB-SQAB	2813

Fonte de Variação	Somas dos Quadrados	GDL	Médias Quadradas	Teste F*	F tab*
Tempo de cura (A)	589496,2	4	147374,0	2147,99	2,60
Composição de aglomerantes (B)	634835,9	4	158709,0	2313,19	2,60
combinação dos efeitos A e B	333910,2	16	20869,4	304,17	1,90
Erro	2813,0	41	68,6		
Total	1561055,2	65			

NOTA – *Observações – $F_c > F_{tab}$, há distinção entre grupos em todos os casos!!!

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 67 – LIMITE DE DECISÃO: REV EXTRAÍDA DO RCPT X TEMPO DE CURA E COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES (2)

$S_x = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	4,2
$L.D = 3 \times S_x$	12,6

FONTE: O autor (2023).

TABELA 59 – TESTE DE TUKEY: REV EXTRAÍDA DO RCPT X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

	Continua				
Tempo de cura \ Traço	TF	TCV	TR	TSCA	TM
7 dias	39,5	41,1	41,2	57,0	100
Diferenças entre grupos	1,6	0,1	15,8	43,5	
		1,7			
		<L.D			
	TF	TCV	TR	TSCA	TM
28 dias	56,5	73,6	93,9	115	239
Diferenças entre grupos	17,2	20,2	21,1	124	
	TF	TR	TCV	TSCA	TM
56 dias	69,4	95,8	158	239	-
Diferenças entre grupos	26,4	62,5	81	-	

TABELA 59 – TESTE DE TUKEY: REV EXTRAÍDA DO RCPT X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

	Conclusão				
	TF	TR	TM	TSCA	
91 dias	60,3	116	294	477	
Diferenças entre grupos	55,9	178	183		
	TF	TR	TM	TCV	TSCA
154 dias	81,4	129	290	365	616
Diferenças entre grupos	47,9	161	75	251	

FONTE: O autor (2023).

TABELA 60 – TESTE DE TUKEY: REV EXTRAÍDA DO RCPT X TEMPO DE CURA

Traço \ Tempo de cura (dias)	7	28	56	91	154
TR	41,2	93,9	95,8	116	129
Diferenças entre grupos		52,7	1,9	20	13
			<L.D		
Traço \ Tempo de cura (dias)	7	28	56	154	91
TM	100	239	-	290	294
Diferenças entre grupos		139		51	4
					<L.D
Traço \ Tempo de cura (dias)	7	28	91	56	154
TF	39,5	56,5	60,3	69,4	81,4
Diferenças entre grupos		17,0	3,8	9,1	12,0
			< L.D	< L.D	
Traço \ Tempo de cura (dias)	7	28	56	91	154
TSCA	57,0	115	244	477	616
Diferenças entre grupos		58	129	233	139
Traço \ Tempo de cura (dias)	7	28	56	91	154
TCV	41,1	73,6	158	-	365
Diferenças entre grupos		32,7	84,4		207

FONTE: O autor (2023).

TABELA 61 – REV EXTRAÍDA DO RCPT

Tempo de cura	TR	TM	TF	TSCA	TCV
7	41,2	100	39,5	57,0	41,1
28	93,9	239	56,5	114,9	73,6
56	95,8	-	69,4	244	158
91	116	294	60,3	477	-
154	129	290	81,4	616	365

FONTE: O autor (2023).

APÊNDICE 6 – CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE NO CONCRETO

QUADRO 68 - ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: DADOS TRAÇO TR

TR						
Tempo de cura (dias)	RES		REV		RCPT	
7	54,7	55,2	53,5	54,8	39,9	-
	52,6	55,2	53,5	-	-	42,4
	53,9	53,4	53,7	-		
28	91,0	90,7	91,3	89,2	-	91,4
	-	90,7	85,7	87,5	95,0	95,2
	89,9	90,4	91,0	92,6		
56	102	105	102,3	104,6	95,0	96,5
	99,9	105	102,7	103,4	-	-
	104	101	105,9	99,9		
91	127	120	124	124	117	-
	120	120	132	119	-	115
	127	128	130	122		
154	137	144	-	139	133	-
	150	131	139	136	126	129
	140	-	134	-		

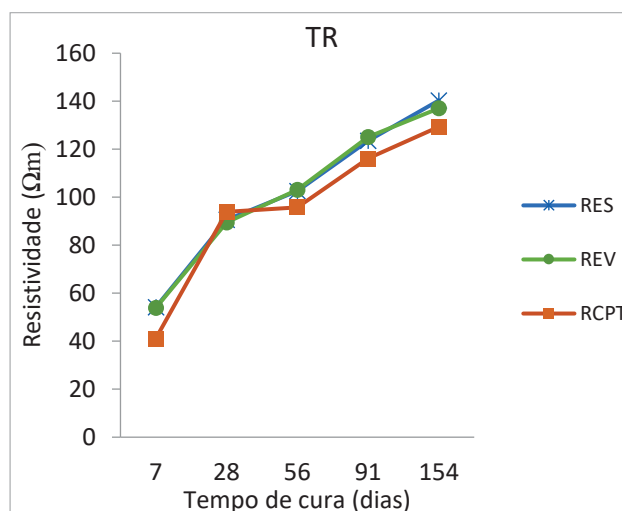
FONTE: O autor (2023).

QUADRO 69 – TABELA ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: TRAÇO TR

TR	Valores Intermediários	Tabela Anova							Teste F
7 dias	TC = T.. ² / N	32330,06		Fonte	SQ	GDL	MQ	Fc	Fc > Ftab Há diferença entre os grupos!!!!!!
	SQT = Σ(Yij ²) – TC	287,01		Entre Grupos (método de medição)	277,3	2	138,7	129,1	
	SQG = Σ(T.j ² / nj) – TC	277,34		Dentro Grupos (Residual)	9,7	9	1,1		
	SQR = SQT – SQG	9,67		Total	287,0	11			
28 dias	TC = T.. ² / N	115522,98		Fonte	SQ	GDL	MQ	Fc	Fc > Ftab Há diferença entre os grupos!!!!!!
	SQT = Σ(Yij ²) – TC	81,55		Entre Grupos (método de medição)	37,8	2	18,9	4,7	
	SQG = Σ(T.j ² / nj) – TC	37,77		Dentro Grupos (Residual)	43,8	11	4,0		
	SQR = SQT – SQG	43,78		Total	81,5	13			
56 dias	TC = T.. ² / N	145120,41		Fonte	SQ	GDL	MQ	Fc	Fc > Ftab Há diferença entre os grupos!!!!!!
	SQT = Σ(Yij ²) – TC	130,37		Entre Grupos (método de medição)	86,0	2	43,0	10,7	
	SQG = Σ(T.j ² / nj) – TC	85,98		Dentro Grupos (Residual)	44,4	11	4,0		
	SQR = SQT – SQG	44,39		Total	130,4	13			
91 dias	TC = T.. ² / N	212381,59		Fonte	SQ	GDL	MQ	Fc	Fc < Ftab Não há diferença entre os grupos!!!!!!
	SQT = Σ(Yij ²) – TC	325,29		Entre Grupos (método de medição)	122,8	2	61,4	3,3	
	SQG = Σ(T.j ² / nj) – TC	122,82		Dentro Grupos (Residual)	202,5	11	18,4		
	SQR = SQT – SQG	202,47		Total	325,3	13			
154 dias	TC = T.. ² / N	223556,65		Fonte	SQ	GDL	MQ	Fc	Fc < Ftab Não há diferença entre os grupos!!!!!!
	SQT = Σ(Yij ²) – TC	478,56		Entre Grupos (método de medição)	228,2	2	114,1	4,1	
	SQG = Σ(T.j ² / nj) – TC	228,17		Dentro Grupos (Residual)	250,4	9	27,8		
	SQR = SQT – SQG	250,39		Total	478,6	11			

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 81 – GRÁFICO DE FATORES: ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TR)



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 70 – TESTE DE TUKEY: CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TR)

Tempo de cura	Teste de Tukey		Ordenando-se as médias		
7 dias	$Sx = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	0,52	RCPT	REV	RES
	$Ld = 3 \times Sx$	1,55	41,2	53,9	54,2
	barra de erro $\pm$	0,78		12,7	0,3
				< L.D	
28 dias	$Sx = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	0,92	REV	RES	RCPT
	$Ld = 3 \times Sx$	2,77	89,6	90,6	93,9
	barra de erro $\pm$	1,39		1,0	3,3
				4,3	
56 dias	$Sx = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	0,93	RCPT	RES	REV
	$Ld = 3 \times Sx$	2,79	95,8	102,5	103,1
	barra de erro $\pm$	1,39		6,7	0,6
				< L.D	
91 dias	$Sx = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	1,99	RCPT	RES	REV
	$Ld = 3 \times Sx$	5,96	116,1	123,5	125,1
	barra de erro $\pm$	2,98		7,4	1,6
				< L.D	
154 dias	$Sx = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	2,64	RCPT	REV	RES
	$Ld = 3 \times Sx$	7,91	129,3	137,1	140,3
	barra de erro $\pm$	3,96		7,7	3,3
				< L.D	

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 71 - ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: DADOS TRAÇO TM

TM						
Tempo de cura (dias)	RES		REV		RCPT	
7	101	104	99,3	103	-	98,9
	101	104	94,2	96,4	100	102
	100	101	96,7	97,9		
28	228	250	218	239	223	-
	240	250	221	226	-	253
	198	236	-	240		
91	305	284	295	274	-	307
	310	284	308	295	281	-
	292	298	282	297		
154	276	275	271	298	-	278
	-	275	263	302	-	302
	318	-	311	281		

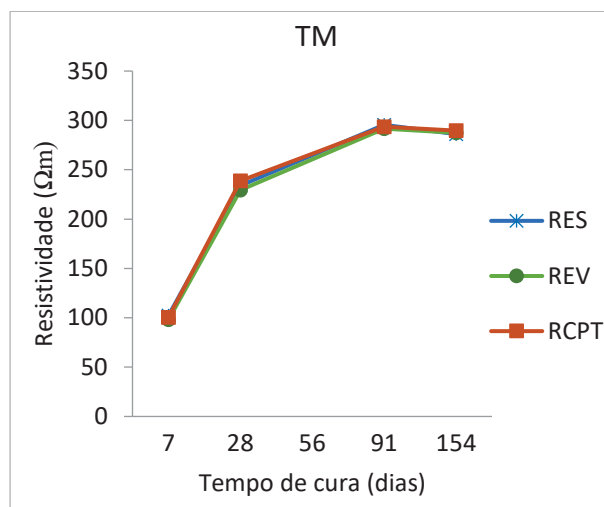
FONTE: O autor (2023).

QUADRO 72 – TABELA ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: TRAÇO TM

TM	Valores Intermediários	Tabela Anova						Teste F
7 dias	$TC = T_{..}^2 / N$	150545,95						
	$SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$	130,34						
	$SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$	57,18						
	$SQR = SQT - SQG$	73,16						Fc > Ftab Há diferença entre os grupos!!!!
28 dias	$TC = T_{..}^2 / N$	705353,27						
	$SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$	2841,93						
	$SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$	130,93						
	$SQR = SQT - SQG$	2711,00						Fc < Ftab Não há diferença entre os grupos!!!!
91 dias	$TC = T_{..}^2 / N$	1206459,77						
	$SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$	1658,41						
	$SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$	45,29						
	$SQR = SQT - SQG$	1613,13						Fc < Ftab Não há diferença entre os grupos!!!!
154 dias	$TC = T_{..}^2 / N$	990999,16						
	$SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$	3467,39						
	$SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$	19,38						
	$SQR = SQT - SQG$	3448,01						Fc < Ftab Não há diferença entre os grupos!!!!

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 82 – GRÁFICO DE FATORES: ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TM)



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 73 – TESTE DE TUKEY: CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TM)

TM	Teste de Tukey		Ordenando-se as médias		
			REV	RCPT	RES
7 dias	$S_x = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	1,10	97,9	100,5	102,3
	$L_d = 3 \times S_x$	3,31		2,5	1,8
	barra de erro $\pm$	1,66		< L.D	< L.D
28 dias	$S_x = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	7,91	229,5	233,9	238,6
	$L_d = 3 \times S_x$	23,73		4,5	4,7
	barra de erro $\pm$	11,86			9,2
					< L.D
91 dias	$S_x = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	5,61	291,6	293,6	295,5
	$L_d = 3 \times S_x$	16,82		2,0	1,9
	barra de erro $\pm$	8,41			3,9
					< L.D
154 dias	$S_x = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	9,79	285,9	287,5	289,7
	$L_d = 3 \times S_x$	29,36		1,6	2,2
	barra de erro $\pm$	14,68			3,8
					< L.D

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 74 - ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: DADOS TRAÇO TF

TF						
Tempo de cura (dias)	RES		REV		RCPT	
7	44,2	43,9	41,4	43,3	37,9	-
	-	43,9	41,4	40,0	40,3	40,3
	44,4	44,5	43,7	42,6		
28	59,8	62,4	60,2	64,0	57,1	56,5
	-	62,4	62,6	58,0	57,2	55,0
	62,8	60,3	61,5	65,5		
56	73,9	72,7	74,4	76,9	71,9	69,7
	70,1	72,7	73,9	78,8	65,4	70,7
	80,2	77,4	-	-		
91	69,3	72,3	70,1	70,4	61,1	59,4
	68,8	72,3	-	72,1	-	-
	70,1	69,3	69,9	-		
154	76,1	79,2	76,8	83,0	-	80,5
	75,6	83,2	77,1	86,5	80,3	83,5
	81,1	-	79,4	-		

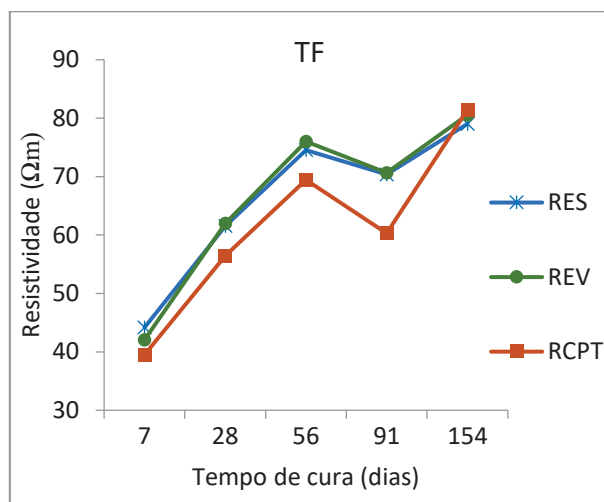
FONTE: O autor (2023).

QUADRO 75 – TABELA ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: TRAÇO TF

TF	Valores Intermediários	Tabela Anova							Teste F
7 dias	$TC = T..^2 / N$ $SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$ $SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$ $SQR = SQT - SQG$	Fonte Entre Grupos (método de medição) Dentro Grupos (Residual) Total	SQ 41,3 13,7 55,1	GDL 2 11 13	MQ 20,7 1,2	Fc 16,6	Ftab 3,98	Fc > Ftab Há diferença entre os grupos!!!!	
28 dias	$TC = T..^2 / N$ $SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$ $SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$ $SQR = SQT - SQG$	Fonte Entre Grupos (método de medição) Dentro Grupos (Residual) Total	SQ 84,1 47,3 131,4	GDL 2 12 14	MQ 42,0 3,9	Fc 10,7	Ftab 3,89	Fc > Ftab Há diferença entre os grupos!!!!	
56 dias	$TC = T..^2 / N$ $SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$ $SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$ $SQR = SQT - SQG$	Fonte Entre Grupos (método de medição) Dentro Grupos (Residual) Total	SQ 97,9 106,8 204,7	GDL 2 11 13	MQ 48,9 9,7	Fc 5,0	Ftab 3,98	Fc > Ftab Há diferença entre os grupos!!!!	
91 dias	$TC = T..^2 / N$ $SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$ $SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$ $SQR = SQT - SQG$	Fonte Entre Grupos (método de medição) Dentro Grupos (Residual) Total	SQ 173,0 16,9 189,8	GDL 2 9 11	MQ 86,5 1,9	Fc 46,1	Ftab 4,26	Fc > Ftab Há diferença entre os grupos!!!!	
154 dias	$TC = T..^2 / N$ $SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$ $SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$ $SQR = SQT - SQG$	Fonte Entre Grupos (método de medição) Dentro Grupos (Residual) Total	SQ 12,3 116,3 128,6	GDL 2 10 12	MQ 6,2 11,6	Fc 0,5	Ftab 4,10	Fc < Ftab Não há diferença entre os grupos!!!!	

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 83 – GRÁFICO DE FATORES: ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TF)



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 76 – TESTE DE TUKEY: CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TF)

TF	Teste de Tukey		Ordenando-se as médias		
7 dias	$Sx = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	0,52	RCPT	REV	RES
	$Ld = 3 \times Sx$	1,55	39,5	42,1	44,2
	Barra de erro $\pm$	0,78		2,6	2,1
28 dias	$Sx = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	0,89	RCPT	RES	REV
	$Ld = 3 \times Sx$	2,66	56,5	61,5	62,0
	Barra de erro $\pm$	1,33		5,1	0,5
					<L.D
56 dias	$Sx = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	1,44	RCPT	RES	REV
	$Ld = 3 \times Sx$	4,33	69,4	74,5	76,0
	Barra de erro $\pm$	2,16		5,1	1,5
					<L.D
91 dias	$Sx = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	0,68	RCPT	RES	REV
	$Ld = 3 \times Sx$	2,05	60,3	70,4	70,6
	Barra de erro $\pm$	1,03		10,1	0,3
					<L.D
154 dias	$Sx = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	1,64	RES	REV	RCPT
	$Ld = 3 \times Sx$	4,91	79,0	80,6	81,4
	Barra de erro $\pm$	2,46		1,6	0,9
					2,4
					<L.D

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 77 - ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: DADOS TRAÇO TSCA

TSCA						
Tempo de cura (dias)	RES		REV		RCPT	
7	58,4	58,3	52,1	57,1	56,3	57,7
	-	58,3	54,5	56,1	-	-
	58,6	58,3	56,1	57,9		
28	118	130	113	120	113	119
	108	130	-	116	115	113
	120	117	114	116		
56	194	196	210	216	248	249
	205	196	225	205	243	235
	196	204	202	206		
91	341	362	369	369	502	475
	334	362	336	345	453	476
	328	358	343	359		
154	482	461	410	423	-	604
	518	492	425	423	626	618
	526	486	-	433		

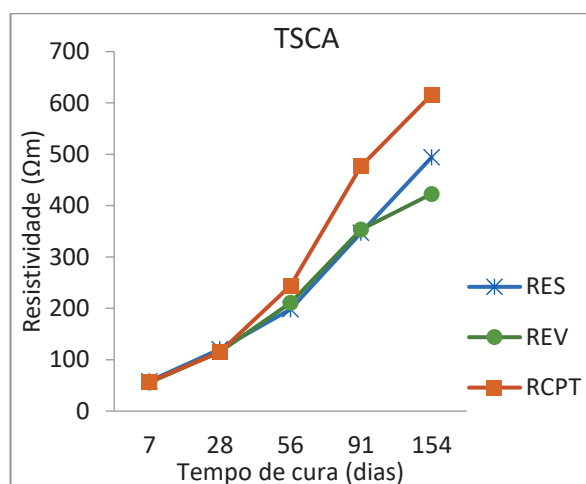
FONTE: O autor (2023).

QUADRO 78 – TABELA ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: TRAÇO TS/CA

TSCA	Valores Intermediários	Tabela Anova						Teste F	
7 dias	$TC = T_{..}^2 / N$ $SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$ $SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$ $SQR = SQT - SQG$	42088,27 43,26 20,76 22,49	Fonte Entre Grupos (método de medição) Dentro Grupos (Residual) Total	SQ 20,8 22,5 43,3	GDL 2 10 12	MQ 10,4 2,2	Fc 4,6	Ftab 4,10	Fc > Ftab Há diferença entre os grupos!!!!
28 dias	$TC = T_{..}^2 / N$ $SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$ $SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$ $SQR = SQT - SQG$	206732,72 487,69 91,30 396,39	Fonte Entre Grupos (método de medição) Dentro Grupos (Residual) Total	SQ 91,3 396,4 487,7	GDL 2 12 14	MQ 45,7 33,0	Fc 1,4	Ftab 3,89	Fc < Ftab Não há diferença entre os grupos!!!!
56 dias	$TC = T_{..}^2 / N$ $SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$ $SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$ $SQR = SQT - SQG$	736364,54 5766,03 5149,83 616,21	Fonte Entre Grupos (método de medição) Dentro Grupos (Residual) Total	SQ 5149,8 616,2 5766,0	GDL 2 13 15	MQ 2.574,9 47,4	Fc 54,3	Ftab 3,81	Fc > Ftab Há diferença entre os grupos!!!!
91 dias	$TC = T_{..}^2 / N$ $SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$ $SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$ $SQR = SQT - SQG$	2336065,72 51193,29 47876,98 3316,31	Fonte Entre Grupos (método de medição) Dentro Grupos (Residual) Total	SQ 47877,0 3316,3 51193,3	GDL 2 13 15	MQ 23.938,5 255,1	Fc 93,8	Ftab 3,81	Fc > Ftab Há diferença entre os grupos!!!!
154 dias	$TC = T_{..}^2 / N$ $SQT = \sum(Y_{ij}^2) - TC$ $SQG = \sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$ $SQR = SQT - SQG$	3428121,25 73408,46 69987,18 3421,28	Fonte Entre Grupos (método de medição) Dentro Grupos (Residual) Total	SQ 69987,2 3421,3 73408,5	GDL 2 11 13	MQ 34.993,6 311,0	Fc 112,5	Ftab 3,98	Fc > Ftab Há diferença entre os grupos!!!!

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 84 – GRÁFICO DE FATORES: ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TSÇA)



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 79 – TESTE DE TUKEY: CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TSÇA)

TSCA	Teste de Tukey		Ordenando-se as médias		
			REV	RCPT	RES
7 dias	$S_x = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	0,72	55,6	57,0	58,4
	$L_d = 3 \times S_x$	2,16		1,4	1,4
	barra de erro $\pm$	1,08		<L.D	<L.D
28 dias	$S_x = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	2,57	114,9	115,8	120,4
	$L_d = 3 \times S_x$	7,71		0,9	4,6
	barra de erro $\pm$	3,86			5,5 <L.D
56 dias	$S_x = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	2,98	RES	REV	RCPT
	$L_d = 3 \times S_x$	8,94	198,5	210,8	244,2
	barra de erro $\pm$	4,47		12,3	33,4
91 dias	$S_x = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	6,92	RES	REV	RCPT
	$L_d = 3 \times S_x$	20,75	347,4	353,7	476,7
	barra de erro $\pm$	10,37		6,3 <L.D	123,0
154 dias	$S_x = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	8,16	REV	RES	RCPT
	$L_d = 3 \times S_x$	24,49	423,0	494,1	616,2
	barra de erro $\pm$	12,25		71,1	122,1

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 80 - ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: DADOS TRAÇO TCV

TCV						
Tempo de cura (dias)	RES		REV		RCPT	
7	43,8	41,7	47,6	45,1	43,2	40,4
	44,4	41,7	46,8	43,9	40,0	41,0
	43,4	42,9	47,8	44,0		
28	74,7	77,4	76,4	76,9	72,5	74,2
	76,8	77,4	77,5	78,3	74,2	73,7
	74,6	76,0	78,1	-		
56	163	159	153	155	160	-
	164	159	156	-	-	156
	162	164	153	156		
154	-	388	-	356	364	366
	388	414	-	358	-	-
	391	404	357	360		

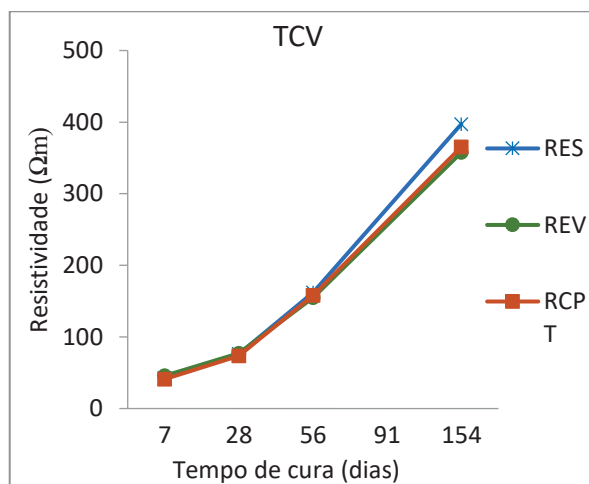
FONTE: O autor (2023).

QUADRO 81 – TABELA ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS: TRAÇO TCV

TSCA	Valores Intermediários	Tabela Anova								
7 dias	TC = $T..^2 / N$	30399,19								
	SQT = $\sum(Y_{ij}^2) - TC$	84,62								
	SQG = $\sum(T.j^2 / nj) - TC$	57,31								
	SQR = SQT – SQG	27,31								
28 dias	TC = $T..^2 / N$	86440,61								
	SQT = $\sum(Y_{ij}^2) - TC$	44,51								
	SQG = $\sum(T.j^2 / nj) - TC$	32,23								
	SQR = SQT – SQG	12,29								
56 dias	TC = $T..^2 / N$	327265,25								
	SQT = $\sum(Y_{ij}^2) - TC$	181,05								
	SQG = $\sum(T.j^2 / nj) - TC$	138,86								
	SQR = SQT – SQG	42,20								
154 dias	TC = $T..^2 / N$	1563930,20								
	SQT = $\sum(Y_{ij}^2) - TC$	4379,07								
	SQG = $\sum(T.j^2 / nj) - TC$	3842,13								
	SQR = SQT – SQG	536,94								
		Fonte	Entre Grupos (método de medição)	Dentro Grupos (Residual)	Total	SQ	GDL	MQ	Fc	Ftab
						57,3	2	28,7	13,6	3,81
						27,3	13	2,1		
						84,6	15			
		Fonte	Entre Grupos (método de medição)	Dentro Grupos (Residual)	Total	SQ	GDL	MQ	Fc	Ftab
						32,2	2	16,1	15,7	3,89
						12,3	12	1,0		
						44,5	14			
		Fonte	Entre Grupos (método de medição)	Dentro Grupos (Residual)	Total	SQ	GDL	MQ	Fc	Ftab
						138,9	2	69,4	16,5	4,10
						42,2	10	4,2		
						181,1	12			
		Fonte	Entre Grupos (método de medição)	Dentro Grupos (Residual)	Total	SQ	GDL	MQ	Fc	Ftab
						3842,1	2	1.921,1	28,6	4,46
						536,9	8	67,1		
						4379,1	10			

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 85 – GRÁFICO DE FATORES: ANOVA CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TCV)



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 82 – TESTE DE TUKEY: CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS (TRAÇO TCV)

Tempo de cura (dias)	Teste de Tukey		Ordenando-se as médias		
			RCPT	RES	REV
7 dias	$Sx = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	0,63	41,12	42,97	45,9
	$Ld = 3 \times Sx$	1,88		1,85	2,9
	barra de erro $\pm$	0,94		<L.D	
28 dias	$Sx = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	0,45	73,6	76,2	77,4
	$Ld = 3 \times Sx$	1,36		2,5	1,3
	barra de erro $\pm$	0,68			<L.D
56 dias	$Sx = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	0,99	154,8	158,3	162,0
	$Ld = 3 \times Sx$	2,96		3,4	3,7
	barra de erro $\pm$	1,48			
154 dias	$Sx = \sqrt{MQR} / \sqrt{nc}$	4,28	357,6	365,3	397,3
	$Ld = 3 \times Sx$	12,84		7,7	32,0
	barra de erro $\pm$	6,42		<L.D	

FONTE: O autor (2023).

APÊNDICE 7 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

QUADRO 83 – ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE – IDENTIFICAÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS

Traço	CP	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
TR	TR38	0,120	0,167	0,283	0,362	0,398
	TR39	0,110	0,159	0,266	0,314	0,344
	TR40	0,109	0,155	0,264	0,334	0,367
	Média (g/cm³)	0,113	0,160	0,271	0,336	0,370
	Sd	0,006	0,006	0,011	0,024	0,027
	Co.V (%)	5,2	3,8	3,8	7,1	7,2
TM	TR38	0,144	0,200	0,364	0,488	0,564
	TR39	0,133	0,195	0,392	0,524	0,604
	TR40	0,114	0,162	0,333	0,453	0,530
	Média (g/cm³)	0,130	0,186	0,363	0,489	0,566
	Sd	0,015	0,021	0,029	0,036	0,037
	Co.V (%)	11,5*	11,0*	8,1	7,2	6,5
TF	TR38	0,205	0,289	0,529	0,678	0,770
	TR39	0,154	0,224	0,453	0,601	0,697
	TR40	0,202	0,280	0,517	0,666	0,749
	Média (g/cm³)	0,187	0,264	0,500	0,648	0,739
	Sd	0,028	0,035	0,041	0,041	0,038
	Co.V (%)	15,1*	13,2*	8,1	6,3	5,1
TSCA	TR38	0,163	0,216	0,366	0,466	0,522
	TR39	0,155	0,212	0,365	0,461	0,519
	TR40	0,141	0,192	0,339	0,434	0,492
	Média (g/cm³)	0,153	0,207	0,357	0,454	0,511
	Sd	0,011	0,013	0,015	0,017	0,017
	Co.V (%)	7,4	6,1	4,2	3,7	3,2
TCV	TR38	0,175	0,235	0,400	0,498	0,543
	TR39	0,113	0,158	0,288	0,367	0,408
	TR40	0,153	0,207	0,364	0,452	0,504
	Média (g/cm³)	0,147	0,200	0,351	0,439	0,485
	Sd	0,032	0,039	0,057	0,066	0,069
	Co.V (%)	21,4*	19,5*	16,2*	15,1*	14,2*

NOTA – *Co.V > 10%: eliminar elementos espúrios!

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 84 – ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE APÓS ELIMINAÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS

Traço	CP	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
TR	TR38	0,120	0,167	0,283	0,362	0,398
	TR39	0,110	0,159	0,266	0,314	0,344
	TR40	0,109	0,155	0,264	0,334	0,367
Absorção (g/cm ²)		0,113	0,160	0,271	0,336	0,370
TM	TM38	0,144	0,200	0,364	0,488	0,564
	TM39	0,133	0,195	0,392	0,524	0,604
	TM40	-	-	0,333	0,453	0,530
Absorção (g/cm ²)		0,138	0,197	0,363	0,489	0,566
TF	TF38	0,205	0,289	0,529	0,678	0,770
	TF39	-	-	0,453	0,601	0,697
	TF40	0,202	0,280	0,517	0,666	0,749
Absorção (g/cm ²)		0,203	0,284	0,500	0,648	0,739
TSCA	TSCA38	0,163	0,216	0,366	0,466	0,522
	TSCA39	0,155	0,212	0,365	0,461	0,519
	TSCA40	0,141	0,192	0,339	0,434	0,492
Absorção (g/cm ²)		0,153	0,207	0,357	0,454	0,511
TCV	TCV38	0,175	0,235	0,400	0,498	0,543
	TCV39	-	-	-	-	-
	TCV40	0,153	0,207	0,364	0,452	0,504
Absorção (g/cm ²)		0,164	0,221	0,382	0,475	0,523

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 85 – ANOVA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Continua

Traço	TR	TM	TF	TSCA	TCV		
Absorção (g/cm ²)	0,398	0,564	0,770	0,522	0,543		
	0,344	0,604	0,697	0,519			
	0,367	0,530	0,749	0,492	0,504		
Totais	1,109	1,697	2,216	1,533	1,046	T..=	7,601
n	3	3	3	3	2	N =	14
Médias	0,370	0,566	0,739	0,511	0,523	Y..=	0,543
Valores Intermediários							
TC = T.. ² / N		4,13					
SQT = $\sum(Y_{ij}^2) - TC$		0,22					
SQG = $\sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$		0,21					
SQR = SQT – SQG		0,01					

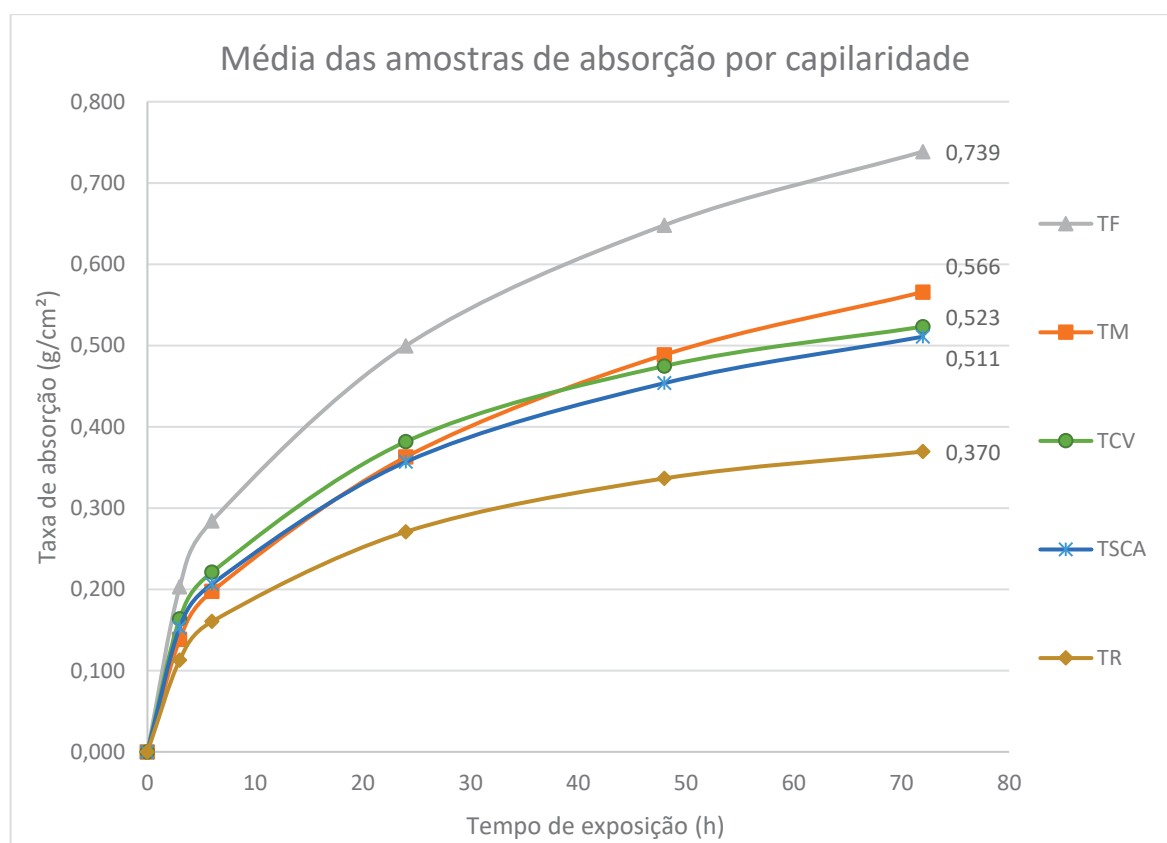
QUADRO 85 – ANOVA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Tabela Anova					Conclusão
Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F*	F _{tab} *
Entre Grupos (Composição de aglomerantes)	0,21	4	0,053	56,8	3,63
Dentro Grupos (Residual)	0,01	9	0,001		
Total	0,22	13			

NOTA – *F_c > F_{tab}, há distinção entre grupos!

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 86 – GRÁFICO DE FATORES: ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 86 – LIMITE DE DECISÃO: ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

$S_x = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	0,018
$L.D = 3 \times S_x$	0,055

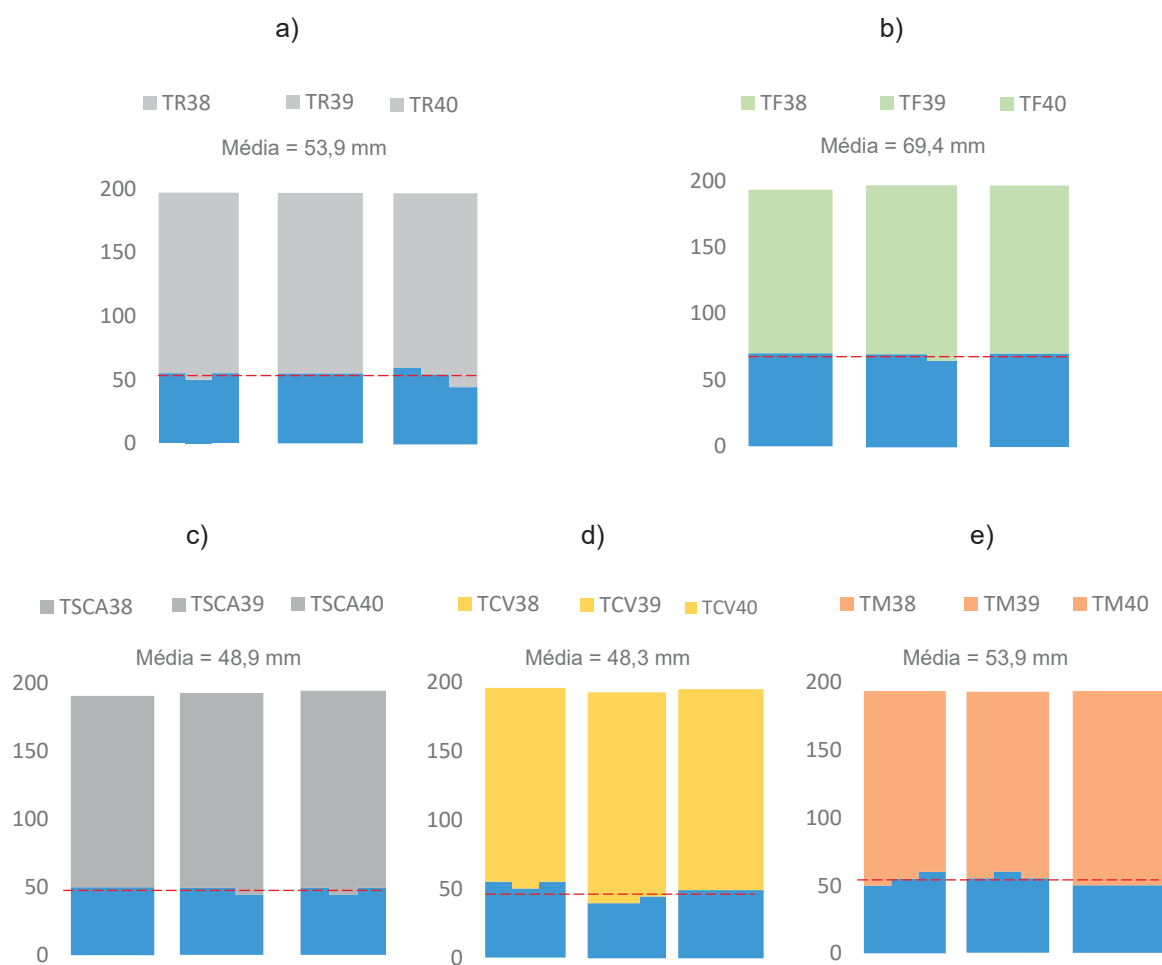
FONTE: O autor (2023).

TABELA 62 – TESTE DE TUKEY: ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

Traço	TR	TSCA	TCV	TM	TF
Média	0,370	0,511	0,523	0,566	0,739
Diferenças entre grupos	0,141	0,012	0,043	0,173	
Diferenças entre grupos		<LD	<LD		

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 87 – PERFIS DE ASCENÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE, POR TRAÇO: a) TR; b) TF; c) TSCA; d) TCV; e) TM



FONTE: O autor (2023).

APÊNDICE 8 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

QUADRO 87 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO: MASSA DOS CORPOS DE PROVA

Traço	CP	Massa dos CPs (g)		
		Massa seca	Massa imersa em água	Massa saturada, após fervura
TR	TR41	3775,0	2325,0	3878,9
	TR42	3676,9	2259,0	3785,5
TM	TM41	3679,1	2252,5	3782,2
	TM42	3647,2	2226,8	3758,2
TF	TF41	3667,1	2275,8	3812,1
	TF42	3641,3	2248,6	3793,7
TSCA	TSCA41	3661,7	2274,4	3808,4
	TSCA42	3630,5	2246,4	3770,2
TCV	TCV41	3570,9	2202,7	3718,6
	TCV42	3622,1	2229,0	3781,0

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 88 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Absorção					
Traço x	TR	TM	TF	TSCA	TCV
CP Tx41	0,028	0,028	0,040	0,040	0,041
CP Tx42	0,030	0,030	0,042	0,038	0,044
Média	2,85%	2,92%	4,07%	3,93%	4,26%

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 89 – ANOVA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Continua

Traço	TR	TM	TF	TSCA	TCV		
Absorção (%)	2,75%	2,80%	3,95%	4,01%	4,14%		
	2,95%	3,04%	4,19%	3,85%	4,39%		
Totais	0,0571	0,0585	0,0814	0,0785	0,0852	T..=	0,3607
n	2	2	2	2	2	N =	10
Médias	0,0285	0,0292	0,0407	0,0393	0,0426	Y..=	0,0361
Valores Intermediários							
TC = T.. ² / N			0,013009				
SQT = $\sum(Y_{ij}^2) - TC$			0,000368				
SQG = $\sum(T_{.j}^2 / n_j) - TC$			0,000356				
SQR = SQT – SQG			0,000012				

QUADRO 89 – ANOVA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Tabela Anova					Conclusão
Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc*	F tab*
Entre Grupos (composição de aglomerantes)	0,000356	4	0,0000891	37,1	5,19
Dentro Grupos (Residual)	0,000012	5	0,0000024		
Total	0,000368	9			

NOTA – * $F_c > F_{tab}$, há distinção entre grupos!

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 90 – LIMITE DE DECISÃO: ABSORÇÃO POR DE ÁGUA POR IMERSÃO X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

$S_x = \sqrt{MQR / \sqrt{nc}}$	0,11%
$L.D = 3 \times S_x$	0,33%

FONTE: O autor (2023).

TABELA 63 – TESTE DE TUKEY: ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO X COMPOSIÇÃO DE AGLOMERANTES

Traço	TR	TM	TSCA	TF	TCV
Média	2,85%	2,92%	3,93	4,07	04,26
Diferenças entre grupos	0,07%	1,01%	0,14%	0,19%	
	<LD		<LD		<LD

FONTE: O autor (2023).