



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**DETERMINAÇÃO INSTANTÂNEA DA RELAÇÃO ÁGUA-
CIMENTO E DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO
CONCRETO NO ESTADO FRESCO ATRAVÉS DO
MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA**

CARLOS EDUARDO BRAUN

São Leopoldo, Fevereiro de 2015.

CARLOS EDUARDO BRAUN

DETERMINAÇÃO INSTANTÂNEA DA RELAÇÃO ÁGUA-CIMENTO E DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO ATRAVÉS DO MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio

Co-Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

Banca examinadora: Prof^a. Dra. Angela Borges Masuero

Prof^a. Dra. Marlova P. Kulakowski

São Leopoldo, Fevereiro de 2015.

B825d

Braun, Carlos Eduardo.

Determinação instantânea da relação água-cimento e da resistência à compressão do concreto no estado fresco através do método da resistividade elétrica / Carlos Eduardo Braun. – 2015. 180 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.

"Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio ; co-orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian."

1. Resistividade elétrica. 2. Relação água-cimento. 3. Concreto no estado fresco. 4. Controle de qualidade do concreto. I. Título.

CDU 624

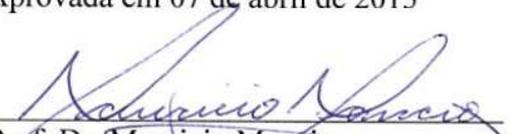
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecário: Flávio Nunes – CRB 10/1298)

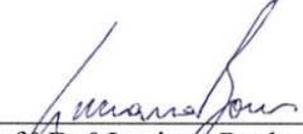
CARLOS EDUARDO BRAUN

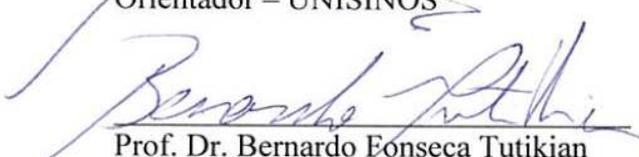
"DETERMINAÇÃO INSTANTÂNEA DA RELAÇÃO ÁGUA-CIMENTO E DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO ATRAVÉS DO MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA"

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

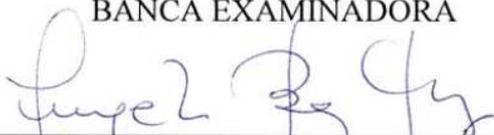
Aprovada em 07 de abril de 2015

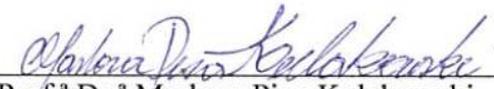

Prof. Dr. Mauricio Marcio
Orientador – UNISINOS


Prof.ª Dr.ª Luciana Paulo Gomes
Coordenadora do PPGEC – UNISINOS


Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian
Coorientador – UNISINOS

BANCA EXAMINADORA


Prof.ª Dr.ª Angela Borges Masuero -UFRGS


Prof.ª Dr.ª Marlova Piva Kulakowski – UNISINOS

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Carlos e Marlise, pelo incentivo e apoio durante todas as etapas da minha vida. Obrigado por todo carinho.

Ao meu orientador, Prof. Mauricio, pela orientação, amizade e experiências compartilhadas.

Ao meu co-orientador, Prof. Bernardo, pelo incentivo na realização do mestrado, por todo o auxílio e pelo tempo disposto.

Agradeço a toda minha família, em especial meus avós e minha tia, Mariza.

Ao meu irmão Rafael, pela dedicação em todos os momentos cruciais.

À minha namorada Cássia, pela compreensão e incentivo em todos os momentos.

Aos colegas de mestrado e aos laboratoristas do LMC.

Aos professores do PPGEC, que contribuíram de várias formas para o nosso aperfeiçoamento.

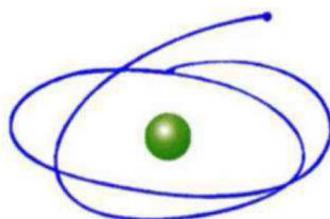
Agradeço aos bolsistas (Guilherme, Douglas e Gabriel), pelo auxílio na realização dos ensaios.

Ao órgão de fomento à pesquisa, CAPES/PROSUP, pela concessão da bolsa de estudos.

À empresa B|A|S *Research & Technology*, pelo suporte e pela parceria na realização da pesquisa. Em especial ao Sr. Wilko e aos engenheiros Sandra e Gerard.

FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior –
CAPES/PROSUP.



C A P E S

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior



B | A | S
RESEARCH & TECHNOLOGY

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	IMPORTÂNCIA DO TEMA DE PESQUISA	23
1.2	OBJETIVOS	26
1.2.1	Objetivos específicos	26
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	26
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND	29
2.1.1	Características no estado fresco	29
2.1.2	Relação água/cimento	31
2.1.3	Resistência mecânica e durabilidade	34
2.2	CIMENTO PORTLAND	35
2.2.1	Cimento Portland com pozolanas	39
2.2.2	Cimento Portland com escória de alto forno	40
2.2.3	Cimento Portland com fíler	41
2.3	MÉTODOS PARA CONTROLE DE QUALIDADE DO CONCRETO	42
2.3.1	Métodos utilizados	43
2.3.1.1	Ensaio de resistência à compressão	43
2.3.1.2	Ensaio de abatimento de tronco de cone	45
2.3.2	Métodos para determinação da relação água/cimento	47
2.3.3	O método da resistividade elétrica	54
2.3.3.1	Determinação analítica do fator geométrico k	64
3	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	69
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	70
3.1.1	Cimento Portland	70
3.1.2	Agregado Miúdo	72
3.1.2.1	Agregado Miúdo I	72
3.1.2.2	Agregado Miúdo II	73
3.1.2.3	Agregado Miúdo Empacotado	74
3.1.3	Agregado Graúdo	75
3.1.4	Água	76
3.2	MÉTODOS EXPERIMENTAIS	76
3.2.1	Planejamento dos experimentos	77
3.2.2	Adaptação e montagem do equipamento	78
3.2.3	Calibração do equipamento e determinação do fator geométrico k	81
3.2.4	Dosagem dos concretos	84
3.2.5	Confecção das amostras	86
3.2.6	Cura	87
3.2.7	Ensaio de resistividade elétrica do concreto no estado fresco	87
3.2.8	Ensaio de resistência à compressão axial	90
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	93
4.1	ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO	93
4.2	ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO	93
4.2.1	CPV-ARI	94
4.2.2	CPIV-32	97

4.2.3	CPIII-40	101
4.2.4	CPII-Z-32.....	106
4.2.5	CPII-F-32	109
4.2.6	CPII-E-40.....	112
4.2.7	Comparação geral dos resultados de resistividade elétrica	115
4.2.8	Análise de variância dos dados de resistividade elétrica	118
4.3	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO	124
4.3.1	CPV-ARI.....	124
4.3.2	CPIV-32.....	127
4.3.3	CPIII-40	129
4.3.4	CPII-Z-32.....	131
4.3.5	CPII-F-32	134
4.3.6	CPII-E-40.....	136
4.3.7	Comparação geral dos resultados de resistência à compressão.....	139
4.4	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO A PARTIR DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA	141
4.4.1	CPV-ARI.....	141
4.4.2	CPIV-32.....	144
4.4.3	CPIII-40	147
4.4.4	CPII-Z-32	150
4.4.5	CPII-F-32	152
4.4.6	CPII-E-40.....	155
5	CONCLUSÃO	159
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	159
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	162
	REFERÊNCIAS	163
	APÊNDICE A – MEDICÕES INDIVIDUAIS	169

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Simbologia dos compostos do clínquer.....	36
Quadro 2 – Fatores de controle da pesquisa.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos e propriedades dos cimentos normalizados nacionais.	37
Tabela 2 – Condutividade equivalente dos principais íons da solução do poro para diluição infinita a 25°C.....	59
Tabela 3 – Características físicas, mecânicas e químicas dos cimentos utilizados.	71
Tabela 4 – Características químicas dos cimentos utilizados.....	71
Tabela 5 – Valores de porcentagem retida acumulada do agregado miúdo I.....	72
Tabela 6 – Características físicas do agregado miúdo I.	72
Tabela 7 – Valores de porcentagem retida acumulada do agregado miúdo II.	73
Tabela 8 – Características físicas do agregado miúdo II.....	73
Tabela 9 – Resultado de empacotamento dos agregados miúdos.....	74
Tabela 10 – Valores de porcentagem retida acumulada do agregado miúdo empacotado.....	75
Tabela 11 – Valores de porcentagem retida acumulada do agregado graúdo.	76
Tabela 12 – Características físicas do agregado graúdo.....	76
Tabela 13 – Determinação da relação água/materiais secos para os cimentos.....	85
Tabela 14 – Traços unitários dos concretos utilizados na pesquisa.	85
Tabela 15 – Consumo de cimento (kg/m ³) dos traços analisados.	85
Tabela 16 – Ensaio de calibração do equipamento.....	93
Tabela 17 – Resistividade elétrica do concreto fresco com CPV-ARI, em função do tempo, para diferentes relações a/c.....	94
Tabela 18 – Relação a/c e a resistividade elétrica do concreto fresco (CPV-ARI).	95
Tabela 19 – Comparação entre a relação a/c efetiva e a estimada a partir do método (CPV-ARI).	97
Tabela 20 – Resistividade elétrica do concreto fresco com CPIV-32, em função do tempo, para diferentes relações a/c.....	98
Tabela 21 – Relação a/c e a resistividade elétrica do concreto fresco (CPIV-32).....	99
Tabela 22 – Comparação entre a relação a/c efetiva e a estimada a partir do método (CPIV-32).	101
Tabela 23 – Resistividade elétrica do concreto fresco com CPIII-40, em função do tempo, para diferentes relações a/c.....	101
Tabela 24 – Relação a/c e a resistividade elétrica do concreto fresco (CPIII-40).....	102
Tabela 25 – Comparação entre a relação a/c efetiva e a estimada a partir do método com ajuste polinomial (CPIII-40).....	104
Tabela 26 – Comparação entre a relação a/c efetiva e a estimada a partir do método (CPIII-40).	105
Tabela 27 – Resistividade elétrica do concreto fresco com CPII-Z-32, em função do tempo, para diferentes relações a/c.....	106
Tabela 28 – Relação a/c e a resistividade elétrica do concreto fresco (CPII-Z-32).	107
Tabela 29 – Comparação entre a relação a/c efetiva e a estimada a partir do método (CPII-Z-32).	108
Tabela 30 – Resistividade elétrica do concreto fresco com CPII-F-32, em função do tempo, para diferentes relações a/c.....	109
Tabela 31 – Relação a/c e a resistividade elétrica do concreto fresco (CPII-F-32).....	110
Tabela 32 – Comparação entre a relação a/c efetiva e a estimada a partir do método (CPII-F-32).	111
Tabela 33 – Resistividade elétrica do concreto fresco com CPII-E-40, em função do tempo, para diferentes relações a/c.....	112
Tabela 34 – Relação a/c e a resistividade elétrica do concreto fresco (CPII-E-32).	113

Tabela 35 – Comparação entre a relação a/c efetiva e a estimada a partir do método (CPII-E-40).	114
Tabela 36 – Comparação geral entre resistividade elétrica e relação a/c para os cimentos analisados.	115
Tabela 37 – Análise de Variância: efeitos da relação a/c e do tempo nas medições de resistividade elétrica do concreto fresco (CPV-ARI).	118
Tabela 38 – Análise de Variância: efeitos da relação a/c e do tempo nas medições de resistividade elétrica do concreto fresco (CPIV-32).	119
Tabela 39 – Análise de Variância: efeitos da relação a/c e do tempo nas medições de resistividade elétrica do concreto fresco (CPIII-40).	119
Tabela 40 – Análise de Variância: efeitos da relação a/c e do tempo nas medições de resistividade elétrica do concreto fresco (CPII-Z-32).	119
Tabela 41 – Análise de Variância: efeitos da relação a/c e do tempo nas medições de resistividade elétrica do concreto fresco (CPII-F-32).	119
Tabela 42 – Análise de Variância: efeitos da relação a/c e do tempo nas medições de resistividade elétrica do concreto fresco (CPII-E-40).	120
Tabela 43 – Análise de Variância: comparação geral entre amostras para 60 minutos de ensaio.	122
Tabela 44 – Análise de Variância: comparação geral entre amostras para 120 minutos de ensaio.	122
Tabela 45 – Resistência à compressão dos concretos com CPV-ARI (a/c=0,35) para diferentes idades.	125
Tabela 46 – Resistência à compressão dos concretos com CPV-ARI (a/c=0,45) para diferentes idades.	125
Tabela 47 – Resistência à compressão dos concretos com CPV-ARI (a/c=0,55) para diferentes idades.	125
Tabela 48 – Resistência à compressão dos concretos com CPV-ARI (a/c=0,65) para diferentes idades.	125
Tabela 49 – Resistência à compressão dos concretos com CPIV-32 (a/c=0,35) para diferentes idades.	127
Tabela 50 – Resistência à compressão dos concretos com CPIV-32 (a/c=0,45) para diferentes idades.	127
Tabela 51 – Resistência à compressão dos concretos com CPIV-32 (a/c=0,55) para diferentes idades.	127
Tabela 52 – Resistência à compressão dos concretos com CPIV-32 (a/c=0,65) para diferentes idades.	128
Tabela 53 – Resistência à compressão dos concretos com CPIII-40 (a/c=0,35) para diferentes idades.	129
Tabela 54 – Resistência à compressão dos concretos com CPIII-40 (a/c=0,45) para diferentes idades.	130
Tabela 55 – Resistência à compressão dos concretos com CPIII-40 (a/c=0,55) para diferentes idades.	130
Tabela 56 – Resistência à compressão dos concretos com CPIII-40 (a/c=0,65) para diferentes idades.	130
Tabela 57 – Resistência à compressão dos concretos com CPII-Z-32 (a/c=0,35) para diferentes idades.	131
Tabela 58 – Resistência à compressão dos concretos com CPII-Z-32 (a/c=0,45) para diferentes idades.	132
Tabela 59 – Resistência à compressão dos concretos com CPII-Z-32 (a/c=0,55) para diferentes idades.	132

Tabela 60 – Resistência à compressão dos concretos com CII-Z-32 (a/c=0,65) para diferentes idades.	132
Tabela 61 – Resistência à compressão dos concretos com CII-F-32 (a/c=0,35) para diferentes idades.	134
Tabela 62 – Resistência à compressão dos concretos com CII-F-32 (a/c=0,45) para diferentes idades.	134
Tabela 63 – Resistência à compressão dos concretos com CII-F-32 (a/c=0,55) para diferentes idades.	134
Tabela 64 – Resistência à compressão dos concretos com CII-F-32 (a/c=0,65) para diferentes idades.	135
Tabela 65 – Resistência à compressão dos concretos com CII-E-40 (a/c=0,35) para diferentes idades.	136
Tabela 66 – Resistência à compressão dos concretos com CII-E-40 (a/c=0,45) para diferentes idades.	137
Tabela 67 – Resistência à compressão dos concretos com CII-E-40 (a/c=0,55) para diferentes idades.	137
Tabela 68 – Resistência à compressão dos concretos com CII-E-40 (a/c=0,65) para diferentes idades.	137
Tabela 69 – Comparativo dos valores de resistência à compressão média para os cimentos estudados, aos 28 dias.	139
Tabela 70 – Comparação entre a resistência à compressão efetiva e a estimada a partir do método (CPV-ARI).	143
Tabela 71 – Comparação entre a resistência à compressão efetiva e a estimada a partir do método (CIV-32).	146
Tabela 72 – Comparação entre a resistência à compressão efetiva e a estimada a partir do método (CIII-40).	149
Tabela 73 – Comparação entre a resistência à compressão efetiva e a estimada a partir do método (CII-Z-32).	151
Tabela 74 – Comparação entre a resistência à compressão efetiva e a estimada a partir do método (CII-F-32).	154
Tabela 75 – Comparação entre a resistência à compressão efetiva e a estimada a partir do método (CII-E-40).	157

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ensaio de abatimento de tronco de cone.	46
Figura 2 – Croqui esquemático do dispositivo de resistividade elétrica sem contato.	57
Figura 3 – Concentração dos íons e resistividade elétrica para a solução da pasta com a/c de 0.4.	59
Figura 4 – Contribuição dos íons na condutividade elétrica na solução do poro com 1 hora. .	60
Figura 5 – Esquema ilustrado do circuito elétrico do experimento e da sonda de resistividade elétrica.	62
Figura 6 – Gráfico de Nyquist.	63
Figura 7 – Fonte de corrente em um espaço esférico.	65
Figura 8 – O potencial elétrico medido no eletrodo M é obtido através da diferença entre os potenciais individuais nos eletrodos A e B.	66
Figura 9 – Fluxograma com as etapas no desenvolvimento da pesquisa.	69
Figura 10 – Curva granulométrica do agregado miúdo I.	73
Figura 11 – Curva granulométrica do agregado miúdo II.	74
Figura 12 – Curva granulométrica do agregado miúdo empacotado.	75
Figura 13 – Curva granulométrica do agregado graúdo.	76
Figura 14 – Corte esquemático do dispositivo.	79
Figura 15 – Detalhes da montagem da sonda: (a) face do eletrodo com rosca e orifício utilizado para passagem dos fios; (b) eletrodo antes de rosqueado ao conjunto do dispositivo.	80
Figura 16 – Equipamento utilizado na realização dos ensaios de resistividade elétrica.	81
Figura 17 – Realização do ensaio de calibração da sonda com soluções de resistividades conhecidas.	83
Figura 18 – Condutímetro utilizado na calibração das soluções.	83
Figura 19 – Equipamentos utilizados na realização dos ensaios de resistividade elétrica.	88
Figura 20 – Recipiente utilizado para realização dos ensaios de resistividade elétrica.	89
Figura 21 – Variação da resistividade elétrica no tempo (CPV).	95
Figura 22 – Relação entre resistividade elétrica e relação a/c do concreto fresco (CPV-ARI).	96
Figura 23 – Variação da resistividade elétrica no tempo (CPIV-32).	98
Figura 24 – Relação entre resistividade elétrica e relação a/c do concreto fresco (CPIV-32).	99
Figura 25 – Variação da resistividade elétrica no tempo (CPIII-40).	102
Figura 26 – Relação entre resistividade elétrica e relação a/c do concreto fresco com ajuste polinomial (CPIII-40).	103
Figura 27 – Relação entre resistividade elétrica e relação a/c do concreto fresco com ajuste logarítmico (CPIII-40).	105
Figura 28 – Variação da resistividade elétrica no tempo (CPII-Z-32).	107
Figura 29 – Relação entre resistividade elétrica e relação a/c do concreto fresco (CPII-Z-32).	108
Figura 30 – Variação da resistividade elétrica no tempo (CPII-F-32).	110
Figura 31 – Relação entre resistividade elétrica e relação a/c do concreto fresco (CPII-F-32).	111
Figura 32 – Variação da resistividade elétrica no tempo (CPII-E-40).	113
Figura 33 – Relação entre resistividade elétrica e relação a/c do concreto fresco (CPII-E-40).	114
Figura 34 – Comparação geral entre a relação a/c e a resistividade elétrica dos cimentos analisados.	115

Figura 35 – Evolução da resistência à compressão do concreto com CPV-ARI.....	126
Figura 36 – Relação <i>a/c versus</i> resistência à compressão do concreto com CPV-ARI.....	126
Figura 37 – Evolução da resistência à compressão do concreto com CPIV-32.....	128
Figura 38 – Relação <i>a/c versus</i> resistência à compressão do concreto com CPIV-32.....	129
Figura 39 – Evolução da resistência à compressão do concreto com CPIII-40.....	130
Figura 40 – Relação <i>a/c versus</i> resistência à compressão do concreto com CPIII-40.....	131
Figura 41 – Evolução da resistência à compressão do concreto com CPII-Z-32.....	133
Figura 42 – Relação <i>a/c versus</i> resistência à compressão do concreto com CPII-Z-32.....	133
Figura 43 – Evolução da resistência à compressão do concreto com CPII-F-32.....	135
Figura 44 – Relação <i>a/c versus</i> resistência à compressão do concreto com CPII-F-32.....	136
Figura 45 – Evolução da resistência à compressão do concreto com CPII-E-40.....	138
Figura 46 – Relação <i>a/c versus</i> resistência à compressão do concreto com CPII-E-40.....	138
Figura 47 – Relação <i>a/c versus</i> resistência à compressão dos concretos, aos 28 dias.....	140
Figura 48 – Diagrama de correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão (CPV-ARI).....	142
Figura 49 – Correlação entre resistência à compressão efetiva e estimada pelo método (CPV-ARI).....	144
Figura 50 – Diagrama de correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão (CPIV-32).....	145
Figura 51 – Correlação entre resistência à compressão efetiva e estimada pelo método (CPIV-32).....	147
Figura 52 – Diagrama de correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão (CPIII-40).....	148
Figura 53 – Correlação entre resistência à compressão efetiva e estimada pelo método (CPIII-40).....	149
Figura 54 – Diagrama de correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão (CPII-Z-32).....	150
Figura 55 – Correlação entre resistência à compressão efetiva e estimada pelo método (CPII-Z-32).....	152
Figura 56 – Diagrama de correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão (CPII-F-32).....	153
Figura 57 – Correlação entre resistência à compressão efetiva e estimada pelo método (CPII-Z-32).....	155
Figura 58 – Diagrama de correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão (CPII-E-40).....	156
Figura 59 – Correlação entre resistência à compressão efetiva e estimada pelo método (CPII-E-40).....	158

RESUMO

BRAUN, C.E. **Determinação instantânea da relação água-cimento e da resistência à compressão do concreto no estado fresco através do método da resistividade elétrica.** São Leopoldo, 2015. 180 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2015.

Durante a execução de elementos de concreto no canteiro de obras, procedimentos de controle de qualidade do concreto são adotados com o objetivo de verificar se o material atende às características de projeto. Esta verificação também visa evitar falhas durante as etapas subsequentes da construção, que podem levar até à inviabilização do empreendimento. Estudos sobre métodos que têm como objetivo estimar a relação água/cimento (a/c) do concreto no estado fresco vêm recebendo maior atenção nos últimos tempos, devido à importância deste parâmetro sobre a resistência e durabilidade das estruturas de concreto, e por não existirem métodos práticos e precisos disponíveis até o momento, que permitam a sua determinação após a realização da mistura. Estudos sobre o método da resistividade elétrica apontam para uma forte correlação entre os valores de resistividade e a relação água/cimento do concreto no estado fresco, possibilitando a utilização do método como uma interessante alternativa para determinação da relação a/c. O presente estudo tem como objetivo apresentar uma análise do método da resistividade elétrica, aplicado à estimativa de valores de relação água/cimento de concretos no estado fresco, confeccionados com cimentos nacionais, além da estimativa de valores de resistência à compressão axial do concreto no estado endurecido. Foram realizados ensaios com concretos dosados a partir do método IPT/EPUSP para seis cimentos nacionais (CPV-ARI, CPIV-32, CPIII-40, CPII-Z-32, CPII-F-32 e CPII-E-40), variando-se a relação a/c (0,35, 0,45, 0,55 e 0,65), utilizando uma sonda aprimorada para realização dos testes, a qual foi desenvolvida neste estudo com base num protótipo já desenvolvido anteriormente. Os resultados obtidos apontam para uma forte correlação existente entre a resistividade elétrica do concreto no estado fresco e a relação a/c, com valores médios das estimativas para relação a/c dentro do intervalo de $\pm 0,02$, com relação aos valores efetivos das misturas testadas. A margem de erro média para as estimativas de relação a/c, considerando-se todos os cimentos testados, ficou no intervalo entre 2,25% e 9,38%. Foram obtidos coeficientes de determinação na ordem de 85,7% a 95,2% para as estimativas de resistência à compressão, mostrando que é possível determinar tanto a relação a/c quanto a resistência à compressão do concreto através do método da resistividade elétrica, quando o material encontra-se ainda no estado fresco.

Palavras-chave: Resistividade elétrica; Relação água-cimento; Concreto no estado fresco; Controle de qualidade do concreto.

ABSTRACT

BRAUN, C.E. **Instantaneous Determination of the water-cement ratio and compressive strength of fresh concrete by the electric resistivity method.** São Leopoldo, 2015. 180 p. Dissertation (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo.

During construction of concrete elements in the building site, quality control proceedings are adopted in order to verify if the concrete reaches its design specifications, which also avoids failures during the subsequent stages of the construction. Test methods used for the determination of the water-cement (w/c) ratio have received increased attention, due to the importance of this ratio for the concrete resistance and durability, and also because there isn't any practical and sufficiently precise method available at the moment, which could be used for determining water-cement ration after mixing. Studies about the electrical resistivity method have shown a strong relationship between the measured resistivity values and water-cement ratio, for the fresh concrete, making this method an interesting alternative for determining w/c ratio. This study presents an analysis of the electrical resistivity method, applied to determine the water-cement ratio of several fresh concrete mixtures made with different types of Brazilian cements, in addition to estimates of compressive strength values of the hardened concretes. Concrete mixtures were made out of six cement types (CPV-ARI, CPIV-32, CPIII-40, CPII-Z-32, CPII-F-32 and CPII-E-40), dosed by the IPT/EPUSP method, and four water-cement ratios (0.35, 0.45, 0.55 and 0.65). Tests were performed using an improved probe, developed in this study, based in one prototype developed previously. Results shown a strong relationship between the electrical resistivity of fresh concrete and its water-cement ratio, with average estimated values within $\pm 0,02$ of the actual water-cement ratio values for the mixtures tested. The average error for the w/c ratio estimated values, considering all of the cements tested, was between 2,25% and 9,38%. The compressive strength estimates reached coefficients of determination between 85,7% and 95,2%, showing that it is possible to estimate both w/c ratio and compressive strength of concrete while still in the fresh state with the electrical resistivity method presented here.

Key-words: Electrical resistivity; Water-cement ratio; Fresh concrete; Concrete quality-control.

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada uma contextualização com apresentação do tema de pesquisa, da justificativa, dos objetivos, da estrutura da pesquisa e das delimitações do trabalho.

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA DE PESQUISA

O concreto, quando comparado a outros materiais de construção utilizados, apresenta-se como um material que conta com inúmeras vantagens em sua aplicação, como por exemplo, o seu menor custo e versatilidade, fazendo com que seja amplamente utilizado em todo o mundo (METHA; MONTEIRO, 2014). Desta forma, o controle tecnológico dos materiais utilizados, bem como dos métodos executivos aplicados, tem importância direta na determinação da qualidade final do projeto, uma vez que a existência de falhas na estrutura da edificação pode comprometer o sucesso – e a segurança – de um empreendimento.

A relação água/cimento (parâmetro relacionado à quantidade de água existente em misturas de concreto) é uma das características mais importantes na determinação da qualidade dos concretos convencionais, estando diretamente relacionada à resistência mecânica e à durabilidade do material. Quando considerado o controle de qualidade do concreto utilizado na execução de estruturas de concreto armado, não existem métodos práticos e difundidos que permitam a verificação da qualidade do concreto fresco, determinando a aceitação (ou rejeição) da mistura baseando-se na obtenção da sua relação a/c.

Um dos ensaios mais comuns no controle da qualidade do concreto é o ensaio de resistência à compressão, descrito pela norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Para realização do ensaio, é realizada a moldagem de corpos de prova no ato do recebimento do concreto e a cura das amostras, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015), sendo estes corpos de prova ensaiados à compressão axial em laboratórios especializados. Um dos problemas da utilização deste método está no tempo necessário para obtenção dos resultados definitivos de resistência, uma vez que os testes são realizados apenas após o endurecimento do concreto na estrutura. Ao longo deste período, com o andamento do processo construtivo da edificação, existe uma grande possibilidade de já existirem novos pavimentos sobre os elementos estruturais, por exemplo. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), no caso de os resultados de resistência à compressão apresentarem valores inferiores aos valores exigidos, fica a encargo do projetista estrutural a avaliação da necessidade de realizar a extração de testemunhos

diretamente da estrutura em questão, para a execução de novos ensaios de compressão e a verificação da resistência desenvolvida pelo concreto, em obra. Se obtidos resultados inferiores aos aceitáveis, uma das alternativas é a realização de procedimentos de reforço estrutural, ou, em casos extremos, a demolição parcial da estrutura (HELENE; TERZIAN, 1993). Estas demandas trazem problemas de atraso no cronograma de obras, além de despesas desnecessárias e não previstas.

O método *in loco* mais utilizado na determinação do aproveitamento (ou não) do concreto em obra é o ensaio de abatimento de tronco de cone (ou *slump test*), descrito pela norma NM 67 (ABNT, 1998), considerando-se os critérios de aceitação provisória definidos pela NBR 12655 (ABNT, 2015). Um dos principais problemas da utilização do método ocorre por se tratar de um ensaio de consistência do concreto no estado fresco. Seus resultados estão diretamente associados à trabalhabilidade, e não, efetivamente, à relação a/c ou à resistência à compressão do concreto.

Vários estudos já foram realizados com o objetivo de determinar a relação a/c de materiais cimentícios, mas a sua determinação instantânea através de medição *in situ* continua como um desafio ainda não resolvido, motivando desta forma engenheiros e pesquisadores nas últimas décadas. Um grande número de estudos têm explorado métodos para determinação da relação água/cimento de concretos no estado fresco (BLAETH, 1972¹ apud NAIK; RAMME, 1989; HOWDYSHHELL, 1977² apud XIAO et al., 2012; LAWRENCE 1984; NÄGELE; HILSDORF, 1980; NAIK; RAMME, 1989; KOELIKER et al., 1994; NAGI; WITHING, 1994; HITEC, 1996; POPOVICS; POPOVICS, 1998; BOIS et al., 1998; NANTUNG, 1998; NORTHWOOD, 1999; DOWEL, BOIS et al., 2000; MACDONALD; NORTHWOOD, 2000; CRAMER, 2002; PHILIPPIDIS; AGGELIS, 2003; BESCHER et al., 2004; SAHU et al., 2004; FOX et al., 2007; MANCHIRYAL; NEITHALATH, 2009; ALI et al., 2010; MANCIO et al., 2010).

O método da resistividade elétrica surge como uma alternativa promissora na determinação da relação a/c de concretos no estado fresco, visto que possibilita uma estimativa bastante precisa da resistência à compressão potencial do concreto no momento do seu recebimento no canteiro de obras (MANCIO et al., 2010). Esta estimativa é possível

¹ Blauth, I. H., "Experience Gained from Measuring the Water-Cement Ratio According to the Thaulow Method," Beionwerk Ferrigrei-Technik (Wiesbaden), No. 8, Aug. 1972, 8 pp.

² Howdyshell, P. A., "Revised Operations Guide for a Chemical Technique to Determine Water and Cement Content of Fresh Concrete," Report M-212, U.S. Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, IL, Apr. 1977, 35 pp.

através da determinação da correlação entre a resistividade elétrica do concreto com a relação a/c. No entanto, para que seja possível a realização deste tipo de estimativa, devem ser conhecidas as correlações entre a relação a/c e resistência à compressão. Em seus estudos, Mancio et al. (2010) utilizaram apenas um tipo de cimento, para quatro relações a/c, o que torna necessária a verificação do método para outras condições de aplicação, particularmente em relação a diferentes tipos de cimento, com diferentes tipos de adições minerais incorporadas à sua composição.

No mercado brasileiro atual, estão disponíveis variados tipos de cimento Portland, os quais se diferenciam pelas proporções dos componentes (clínquer, sulfatos de cálcio, material carbonático e adições, tais como escórias e pozolanas) utilizados no seu processo de fabricação, e por suas características químicas e físicas, como a finura, calor de hidratação, coloração e resistência a agentes agressivos (PEREIRA, 2011).

A utilização de materiais finamente moídos no concreto, normalmente conhecidos como adições minerais, é uma prática comum na tecnologia do concreto. As adições minerais são utilizadas por razões econômicas, uma vez que algumas adições têm custos inferiores, quando comparadas ao cimento Portland ou ao clínquer, como é o caso da cinza volante e da escória de alto forno. Existem também justificativas relacionadas às melhorias na trabalhabilidade de concretos e argamassas no estado fresco, além da garantia de uma melhor durabilidade, necessária às condições de serviço (SILVA, 2010). As justificativas relacionadas à sustentabilidade na cadeia de construção civil estão voltadas à redução no consumo de energia e na emissão de CO₂ na produção do cimento, além da minimização na necessidade da extração de matérias-primas para sua produção (MEHTA; MONTEIRO, 2014; SILVA, 2010).

Sabendo-se que importantes propriedades, como resistência mecânica e durabilidade, estão diretamente relacionadas às quantidades de água e de cimento utilizadas na mistura de concreto, surge a hipótese de que o método da resistividade elétrica possa indicar, com precisão, a relação entre estes materiais, sendo esta informação de grande utilidade no controle de qualidade destas misturas. Justifica-se, assim, a presente pesquisa numa tentativa de contribuir ao estudo do método da resistividade elétrica, aplicado na estimativa da relação água/cimento de concretos no estado fresco ao longo de suas idades iniciais, produzidos com a utilização de cimentos que contêm adições minerais.

Considerando-se que, durante a fase de dosagem do concreto normalmente é estabelecida a correlação existente entre a resistência à compressão e a relação a/c, a

determinação da relação a/c no momento do recebimento do concreto, *in loco*, permitiria também a estimativa da resistência à compressão esperada do lote recebido. Tal informação seria uma importante ferramenta na tomada de decisão sobre a aceitação ou não do material, facilitando o controle e garantido a sua qualidade.

Assim, justifica-se a utilização de variados tipos de cimentos disponíveis no mercado com o objetivo de verificar a aplicabilidade do método da resistividade elétrica aos concretos confeccionados com cimentos que atendam às normatizações brasileiras, com diferentes tipos e teores de adições minerais.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é verificar a correlação existente entre as medidas de resistividade elétrica e a relação água/cimento de concretos no estado fresco.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- construir uma sonda otimizada para medição da resistividade elétrica do concreto no estado fresco;
- analisar a influência da relação água/cimento na resistividade elétrica obtida para as amostras de concreto no estado fresco;
- analisar a influência do tipo de cimento na resistividade elétrica obtida para as amostras de concreto no estado fresco;
- verificar o comportamento da resistividade elétrica do concreto no estado fresco ao longo do tempo, num intervalo de até 2 horas após a mistura;
- estabelecer a correlação entre a relação água/cimento e a resistência à compressão esperada, para os diferentes tipos de cimento analisados, possibilitando a sua estimativa com base nas leituras de resistividade elétrica;
- verificar a precisão das estimativas de relação a/c e resistência à compressão a partir das medições de resistividade elétrica e das curvas de correlação obtidas.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

A presente dissertação estrutura-se em cinco capítulos, conforme a descrição realizada na sequência.

No presente capítulo, que constitui a introdução, encontram-se a importância do tema de pesquisa, os objetivos geral e específicos, a estrutura e as delimitações do trabalho.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre temas relevantes para o completo entendimento deste trabalho. Inicialmente é apresentada uma breve descrição sobre o concreto de cimento Portland. Em seguida são apresentados os métodos para o controle de qualidade do concreto utilizados na atualidade. Ao final é abordado o cimento Portland.

No terceiro capítulo, apresentam-se os estudos preliminares realizados, como desenvolvimento e calibração do equipamento utilizado nos ensaios de resistividade elétrica, como a metodologia de ensaio nos concretos. A seguir são apresentadas a caracterização dos materiais utilizados nos ensaios e o programa experimental, compreendendo aspectos relacionados ao planejamento do experimento e descrição dos ensaios realizados.

No quarto capítulo são apresentados os resultados parciais obtidos durante o programa experimental, juntamente com a análise e discussão dos mesmos.

No quinto e último capítulo serão apresentadas as conclusões do trabalho, além de sugestões para futuras pesquisas.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Para este estudo foram utilizados seis tipos de cimentos (CPV-ARI, CPIV-32, CPPIII-40, CPII-Z-32, CPII-F-32 e CPII-E-40), disponíveis no mercado nacional. Foram utilizadas quatro diferentes relações água/cimento, sendo elas de 0,45, 0,50, 0,55 e 0,60, para elaboração das curvas de correlação com a resistividade elétrica. Os ensaios de resistividade elétrica serão realizados nas 2 horas iniciais após a mistura do concreto, antes do início da pega, com as medições sendo realizadas a cada 10 minutos.

Os ensaios de compressão axial foram realizados em amostras cilíndricas, com idades de ruptura de 3, 7, 14 e 28 dias.

As curvas de correlação elaboradas podem ser aplicadas apenas às misturas estudadas, respeitadas as condições de cura e temperatura à que foram submetidas as amostras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com o tema proposto para este trabalho e com os objetivos estabelecidos no capítulo 1, a seguir é apresentada a revisão sobre o concreto de cimento Portland, o cimento Portland e os métodos para o controle de qualidade do concreto.

2.1 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

O concreto, elaborado a partir do cimento Portland, é o material estrutural mais importante na construção civil da atualidade. Mesmo sendo um dos materiais mais recentes entre os materiais de construção estruturais, pode ser considerado como uma das descobertas mais importantes na história do desenvolvimento da humanidade, assim como da sua qualidade de vida (HELENE; ANDRADE, 2010).

O cimento Portland possui inúmeras aplicações na construção civil, através da confecção de pastas, argamassas e concretos, sendo utilizados para execução de estruturas em concreto armado, como por exemplo lajes, vigas e pilares, pavimentos, tubulações, fundações, obras de arte e hidráulicas, entre outras, além de revestimentos (PEREIRA, 2011).

Durante a mistura do concreto, o cimento Portland, juntamente com a água, forma uma pasta de consistência mais ou menos fluida, dependendo da quantidade de água a ser adicionada. Esta pasta envolve as partículas de agregados, que possuem variadas dimensões, produzindo um material que, nas horas iniciais, apresenta-se em um estado que permite a sua moldagem em fôrmas, com as mais variadas formas geométricas possíveis (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Com o tempo, esta mistura passa a endurecer através da reação irreversível entre a água e o cimento, fazendo com que adquira resistência mecânica, capaz de torná-lo um material com propriedades estruturais, mesmo sob os mais diversos ambientes de exposição, isto quando dosado de forma atender às condições a que será exposto (HELENE; ANDRADE, 2010).

2.1.1 Características no estado fresco

O material concreto possui duas fases físicas distintas, sendo que na primeira, denominada concreto fresco, compreende um período de tempo curto, em geral na ordem de 1 a 5 horas. Esta fase incorpora o intervalo de tempo necessário para que sejam realizadas a mistura, o transporte, o lançamento e o adensamento do concreto, até quando se dá o início da pega. Já a segunda fase, denominada de concreto endurecido, é iniciada com a hidratação do

cimento (após o início da pega) e posterior endurecimento do concreto, estendendo-se por toda a vida da estrutura (HELENE; ANDRADE, 2010). Uma das principais propriedades do concreto, que determina a sua aptidão para que este possa ser manuseado e moldado nas mais variadas formas é a sua consistência. Na tecnologia do concreto, esta característica pode ser definida como a maior ou menor capacidade do concreto de se deformar sob a ação da sua própria massa (NEVILLE, 1997).

No concreto fresco, a água é o agente responsável pela diminuição do atrito entre as partículas, através da formação de uma película envolvente aos grãos (ISAIA, 2011). Além da água, aditivos plastificantes ou modificadores de viscosidade, além da adequada composição granulométrica dos agregados, contribuem para que não haja perda da integridade do concreto nesta fase.

Os conceitos de consistência e trabalhabilidade surgem da necessidade de explicitar, mesmo que de forma sensorial, as características desejadas dos concretos durante as etapas de mistura, transporte, lançamento, consolidação e acabamento (ROMANO et al., 2011). De uma forma geral, a consistência está relacionada com a facilidade de escoamento do material e com a sua coesão. Já a trabalhabilidade está relacionada à adequação dos concretos a todas as etapas de utilização do concreto no estado fresco, sendo que, desta forma, consistência está contida dentro de um conceito maior de trabalhabilidade.

A NBR NM 67 (ABNT, 1998) descreve o método de ensaio para determinação da consistência do concreto no estado fresco, através do teste de abatimento do tronco de cone, definido pela normatização brasileira. A consistência é influenciada por fatores intrínsecos ao concreto, como a sua relação água/materiais secos, tipo e consumo de cimento, traço (quantidade de materiais secos por metro cúbico), teor de argamassa, além do tamanho, forma e textura dos agregados. Além destes fatores, existem os fatores externos de influência, entre eles os fatores de transporte, lançamento, características das fôrmas, esbeltez dos elementos estruturais, densidade e forma de distribuição das armaduras, além de outros. Assim, a consistência pode ser considerada uma propriedade física que designa a habilidade do concreto de ser manipulado, sem apresentar segregação (ISAIA, 2011).

Para o concreto fresco, misturas com diferentes relações a/c podem possuir quantidades de água total idênticas, o que acarreta em “porosidades” muito similares (MONTEIRO; HELENE, 1994). Para certa dimensão dos agregados e consistência, diferentes misturas de concreto podem possuir a mesma quantidade de água (em kg/m³), independente da relação a/c, que é escolhida em função da resistência à compressão desejada.

Segundo Neville (2003), existem três principais aspectos que devem ser considerados com relação à água de amassamento do concreto. Em primeiro lugar deve ser considerada a qualidade da água, devendo-se levar em conta as impurezas nela dissolvidas ou em suspensão, pois podem afetar algumas propriedades do concreto. O segundo aspecto está relacionado à quantidade de água por unidade de volume do concreto (l/m^3), isto é, o conteúdo de água que afeta consideravelmente a trabalhabilidade da mistura. Já o terceiro aspecto diz respeito à relação entre a quantidade de água em relação à de cimento, conhecida como relação água/cimento, sendo considerado um dos principais parâmetros que governam a qualidade global do concreto.

2.1.2 Relação água/cimento

A resistência e a durabilidade de concretos e argamassas são diretamente influenciadas pela relação água/cimento, tendo em vista que esta relação controla a forma, o tamanho e a distribuição da sua estrutura de poros. Em outras palavras, pode-se afirmar que a relação água/cimento tem papel fundamental na formação da microestrutura das pastas, argamassas e concretos a base de cimento Portland (PEREIRA, 2011).

A correlação entre a resistência à compressão e a relação água/cimento foi inicialmente verificada por René Féret na França, ainda no século XIX (HELENE; ANDRADE, 2010). Mas foi através de Abrams (1918), nos Estados Unidos, que este conceito adquiriu grande influência, através da “Lei de Abrams”, sendo considerado o principal parâmetro para definição da resistência e durabilidade dos concretos, para os concretos com fluidez normal, expressa através da Equação 1:

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

f_c = resistência à compressão do concreto para certa idade;

k_1 e k_2 = constantes que dependem da idade e dos componentes do concreto;

a/c = relação água/cimento ou água/aglomerante, em massa.

Estas considerações são válidas para um amplo intervalo de relações água/cimento, no entanto, quanto menor for esta relação, mais difícil será a obtenção de concretos plásticos, mesmo com um aumento sensível no teor de pasta no concreto (HELENE; ANDRADE, 2010).

As propriedades do concreto endurecido estão ligadas direta ou indiretamente à água utilizada na mistura, começando pelas reações de hidratação do cimento e as posteriores transformações físico-químicas decorrentes, como o início e o fim de pega, o calor de hidratação, a retração entre outras (ISAIA, 2011). Estas reações de hidratação estão relacionadas às modificações que ocorrem quando o cimento anidro ou uma das suas fases, sejam misturados à água.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), o cimento anidro não possui propriedades aglomerantes por si só, adquirindo esta propriedade quando misturado com a água, por intermédio de reações químicas denominadas hidratação do cimento. O resultado deste processo de hidratação são produtos que possuem características de pega e endurecimento.

A relação água/cimento e o grau de hidratação são os principais parâmetros ligados às propriedades mecânicas do concreto (módulo de elasticidade, resistência à compressão, à tração, fluência, relaxação, abrasão e outras), de absorção capilar, de permeabilidade por gradiente de pressão de água ou de gases, de difusividade da água ou dos gases, de migração elétrica de íons, entre outras (HELENE; ANDRADE, 2010).

Em função da forte correspondência entre a relação água/cimento, a resistência à compressão e a durabilidade do concreto estrutural, a NBR 6118 (ABNT, 2014) determina a utilização de requisitos mínimos, no que diz respeito à relação água/cimento a ser adotada no projeto de estruturas. A definição da relação água/cimento máxima é feita de acordo com o tipo de armadura do elemento estrutural a ser dimensionado (concreto armado ou protendido) e a classe ambiental à qual a estrutura estará exposta.

A resistência à compressão do concreto diminui com o aumento da relação a/c. Na verdade, esta relação tem influência significativa em grande parte das propriedades do concreto no estado endurecido, em particular a resistência e durabilidade (NEVILLE, 1997). Contudo, ocorrem situações onde quantidades adicionais de água são acrescentadas no canteiro de obras, com o objetivo de obter uma maior fluidez pelo concreto no estado fresco, o que afeta severamente os parâmetros de resistência e de durabilidade do concreto (XIAO et al., 2012).

A NBR 7212 (ABNT, 2012) fixa as condições exigíveis quanto à execução de concretos dosados em central, incluindo as operações de armazenamento dos materiais, dosagem, mistura, transporte, recebimento, controle de qualidade, inspeção, aceitação e

rejeição. Segundo a norma, a quantidade de água total do concreto compreende, além da água adicionada, a relacionada à umidade dos agregados, a utilizada para dissolução dos aditivos (fração líquida do aditivo) e a adicionada na forma de gelo, quando for o caso. Com relação à adição suplementar de água para correção de abatimento, somente são permitidas adições devido à evaporação, antes do início da descarga, desde que, entre outros aspectos, não seja ultrapassado o abatimento limite máximo especificado e que não ocorra um aumento no abatimento em mais de 25 mm.

Estes aspectos, além da necessidade do controle de qualidade do concreto, fazem com que seja de grande necessidade a determinação fácil e prática da relação a/c no canteiro de obras, garantindo a qualidade do material utilizado na estrutura.

Quando fixada uma relação água/cimento para pasta, isto é, com uma determinada fluidez, concretos com diferentes valores de abatimento podem ser obtidos, isto a partir da variação do volume de pasta utilizada na mistura. Em concretos mais plásticos são utilizados maiores volumes de pasta por metro cúbico, enquanto que para concretos menos plásticos é necessária a situação inversa, onde são utilizadas menores quantidades de pasta, mesmo que estas pastas possuam a mesma fluidez (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Portanto, para concretos produzidos com um mesmo cimento e agregados, com uma relação água/cimento fixada, quanto maior o abatimento desejado (mais fluido), maior será o consumo de cimento do concreto. Por outro lado, para um abatimento fixo, quanto menor a relação água/cimento do concreto, maior serão seus desempenhos quanto à resistência mecânica e à durabilidade, e maior também será o seu consumo de cimento para um determinado volume.

A dificuldade na obtenção de concretos com maior plasticidade, à medida que era reduzida a relação água/cimento, limitou, por décadas, a utilização de concretos de maior resistência e maior durabilidade. Esta limitação passou a ser superada a partir dos anos 50, quando do surgimento de uma nova gama de aditivos plastificantes, com uma eficiência muito superior que os anteriores, sendo denominados de superplastificantes. Estes aditivos são empregados, na sua maior parte, em concretos de alta resistência e/ou concretos autoadensáveis, onde o efeito conjugado de baixas relações água/cimento e de elevados abatimentos seria impossível de ser atingido, sem a utilização destes aditivos (HELENE; ANDRADE, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.3 Resistência mecânica e durabilidade

A essência da resistência mecânica do concreto está baseada na quantidade e na qualidade dos compostos hidratados, ou do teor de sólidos, da pasta cimentícia. Os produtos do processo de hidratação, em especial os silicatos hidratados, possuem uma área específica extremamente pequena, se entrelaçando com aluminatos, ferroaluminatos hidratados e outros compostos, o que permite a formação de um conjunto resistente e com forte aderência entre si. A quantidade de água necessária para a hidratação completa do cimento requer uma relação água/cimento da ordem de 0,40 (ISAIA, 2011). Para os concretos usuais, esta relação geralmente é mais elevada do que este valor, fazendo com que a água em excesso (além da estritamente necessária para as reações químicas), fique alojada nos interstícios dos produtos de hidratação, formando vazios. Uma vez que o caminho das forças através da microestrutura do concreto se dá somente pelo material sólido, quanto maior a quantidade de água em excesso, maior será a relação água/cimento, maior será a quantidade de vazios e, por consequência, menor será a resistência mecânica do concreto.

A relação água/cimento é um fator de grande importância na limitação do ingresso de substâncias agressivas para o interior do concreto. Ela exerce influência direta sobre a porosidade das matrizes cimentícias, isto é, interfere na forma, no volume e na distribuição do tamanho dos poros. A água em excesso (capilar ou até mesmo adsorvida) presente entre os vazios dos compostos sólidos da pasta, serve de acesso ao trânsito de fluidos, carregando substâncias agressivas para o interior do concreto. Desta forma, os vazios gerados pela água em excesso, adicionada durante a mistura do concreto, afetam diretamente a durabilidade das estruturas e a sua vida útil. De acordo com Pereira (2011), são vários os aspectos tecnológicos do concreto (relação água/cimento, distribuição granulométrica, composição química, etc.) que contribuem para a redução do índice de vazios e para o aumento da compactidade do concreto, e que atenuam, assim, o transporte de agentes agressivos para o interior das estruturas.

De acordo com Monteiro e Helene (1994), para uma consistência fixa, o aumento nas quantidades de cimento acarreta na diminuição da relação a/c, causando uma redução significativa na porosidade da matriz, o que não só aumenta a sua resistência, mas também diminui o coeficiente de permeabilidade, os efeitos de carbonatação, e a profundidade e quantidade de absorção capilar. Nem todas as situações permitem a diminuição do teor de água, em função da trabalhabilidade do concreto, sendo necessária a recorrência ao uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes, de acordo com o teor de água que se deseja

atingir para a mistura. O aumento da compacidade traz como consequência lógica uma maior dificuldade à penetração de agentes agressivos ao interior do concreto, ocasionando também num aumento da sua resistência mecânica (MEHTA; MONTEIRO; 2014).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) segue uma tendência internacional, ao especificar classes de agressividade ambiental ou de exposição. Este detalhamento tem por objetivo garantir a durabilidade das estruturas somente por meio da definição da relação água/cimento máxima, do cobrimento mínimo e da resistência à compressão mínima a serem utilizados, sem levar em consideração o tipo de cimento utilizado e a vida útil mínima a ser atingida pela estrutura (PEREIRA, 2011). Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), a durabilidade consiste na capacidade da estrutura de resistir às influências ambientais previstas e definidas pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início do processo de elaboração do projeto.

A qualidade efetiva do concreto utilizado na obra é assegurada através de um correto procedimento de mistura, transporte, lançamento, adensamento, cura e desenforma. Em grande parte dos casos, concretos de maior resistência, sob determinadas circunstâncias, apresentam maior potencial de durabilidade do que um concreto com resistência mais baixa, obtidos com os mesmos materiais. No entanto, a resistência à compressão nem sempre é, por si só, um parâmetro suficiente para determinar a durabilidade do concreto, uma vez que esta depende das camadas superficiais do concreto em uma estrutura. Nestas camadas superficiais, a moldagem, o adensamento, a cura e o processo de desenforma têm efeito de grande importância nas propriedades de difusibilidade, permeabilidade e absorção capilar de água e de gases (HELENE; ANDRADE, 2010).

Nos dias atuais, em função do aumento da atenção voltada às questões de sustentabilidade no planeta, o aumento da durabilidade e da vida útil das estruturas é de grande importância, onde a resistência deve ser tratada como uma consequência da durabilidade e não vice-versa, como tratado no passado (ISAIA, 2011).

2.2 CIMENTO PORTLAND

A ASTM C 150 (2007) define o cimento Portland como um material cimentante hidráulico, produzido através da moagem do clínquer, constituído essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfatos de cálcio. Clínqueres são nódulos com diâmetro variando de 5 a 25mm, compostos de material sinterizado que é obtido quando uma mistura de matérias-primas de composição predeterminada é aquecida em altas temperaturas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O clínquer é composto principalmente de óxidos de cálcio e de sílica, em proporções adequadas. Pedra calcária, giz e mármore são fontes comuns de óxido de cálcio. Já a sílica é obtida, principalmente, de argilas e xistos. As argilas também possuem alumina em sua composição, assim como podem possuir óxidos de ferro e álcalis (CARVALHO, 2002). Aproximadamente 5% de gipsita ou sulfato de cálcio são adicionados à mistura do clínquer durante a moagem, com o objetivo de controlar as reações iniciais de pega (hidratação) da mistura.

Os óxidos e compostos derivados do clínquer são expressos a partir das abreviações do Quadro 1, de acordo com a nomenclatura comum à comunidade científica ligada ao cimento.

Quadro 1 - Simbologia dos compostos do clínquer

Óxidos	Abreviação	Compostos	Abreviação
CaO	C	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
SiO ₂	S	2CaO.SiO ₂	βC ₂ S
Al ₂ O ₃	A	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M	4CaO.3Al ₂ O ₃ .SiO ₃	C ₄ A ₃ S
SO ₄	S̄	3CaO.2SiO ₂ .3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
H ₂ O	H	CaSO ₄ .2H ₂ O	C \bar{S} H ₂

Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

No mercado brasileiro atual, estão disponíveis variados tipos de cimento Portland. O Cimento Portland Comum (CPI) é a referência para os demais tipos de cimento Portland, no entanto, este não está disponível para comercialização. Estes tipos de cimento se diferenciam pelas proporções dos componentes (clínquer, sulfatos de cálcio, material carbonático e adições, tais como escórias, pozolanas e calcário) utilizados no seu processo de fabricação, além das suas propriedades intrínsecas, como a alta resistência inicial, baixo calor de hidratação, coloração, resistência a agentes agressivos (PEREIRA, 2011). A seguir são apresentados os cimentos nacionais existentes, de acordo com as normas da ABNT (apresentadas na Tabela 1):

- a) Cimento Portland Comum (CPI) - ABNT
 - CPI – Cimento Portland Comum
 - CPI-S – Cimento Portland Comum com Adição
- b) Cimento Portland Composto (CPII)
 - CPII-E – Cimento Portland Composto com Escória
 - CPII-Z – Cimento Portland Composto com Pozolana

CPII-F – Cimento Portland Composto com Fíler

- c) Cimento Portland de Alto Forno (CPIII)
- d) Cimento Portland Pozolânico (CPIV)
- e) Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI)
- f) Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS)
- g) Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC)
- h) Cimento Portland Branco (CPB)
- i) Cimento Portland para Poços Petrolíferos

Na Tabela 1 estão apresentados os tipos e as composições dos cimentos normalizados no Brasil.

Tabela 1 – Tipos e propriedades dos cimentos normalizados nacionais.

Tipo de cimento Portland	Sigla	Componentes em massa (%)				Classe de resistência aos 28 dias (MPa)	ABNT NBR
		Clínquer mais sulfatos	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático		
Comum	CPI	100	0			25 / 32 / 40	5732/1991
	CPI-S	99 a 95	1 a 5			25 / 32 / 40	
Composto	CPII-E	94 a 56	6 a 34	-	0 a 10	25 / 32 / 40	11578/1997
	CPII-Z	94 a 76	-	6 a 14	0 a 10	25 / 32 / 40	
	CPII-F	94 a 90	-	-	6 a 10	25 / 32 / 40	
Alto-Forno	CPIII	65 a 25	35 a 70	-	0 a 5	25 / 32 / 40	5735/1991
Pozolânico	CPIV	85 a 45	-	15 a 50	0 a 5	25 / 32	5736/1999
Alta resistência Inicial	CPV-ARI	100 a 95	-	-	0 a 5	34 (7dias)	5733/1991
Branco Estrutural	CPB	100 a 75	-	-	0 a 25	25 / 32 / 40	12989/1993
Branco Não-Estrutural	CPB	74 a 50	-	-	26 a 50	-	
Para Poços Petrolíferos	CPP	100	-	-	-	25 / 32 / 40	9831/2008

Cabe ressaltar que nem todos os tipos de cimento são fabricados em todas as regiões do Brasil, uma vez que a sua produção depende essencialmente da disponibilidade das matérias primas, incluindo as adições, além dos equipamentos de moagem e armazenamento das indústrias instaladas em cada região. Por exemplo, a localização de jazidas de carvão mineral no sul do país condicionou a instalação de termelétricas abastecidas pelo carvão

mineral nesta região, fazendo com que estejam disponíveis as chamadas pozolanas de cinzas volantes (resíduos da queima do carvão) para a indústria cimenteira local. Por consequência, a produção de cimentos Portland pozolânicos com cinzas volantes tem maior concentração na Região Sul. Já na Região Sudeste encontram-se instaladas grandes siderúrgicas, fazendo com que a escória granulada de alto-forno, resíduo gerado na fabricação do ferro gusa, seja um material abundantemente disponível. Por consequência, a maior concentração de cimento Portland de alto-forno está situada nesta região (BATTAGIN; BATTAGIN, 2010).

A utilização de adições minerais ao cimento Portland vem aumentando nos últimos anos, com a finalidade de aperfeiçoar determinadas propriedades em empregos específicos, as quais o cimento Portland não possui. Além disso, a substituição parcial do cimento Portland por adições minerais, como é o caso de subprodutos de processos industriais, resíduos da agricultura e materiais reciclados, podem minimizar os impactos gerados durante o processo de produção do cimento, através da diminuição das emissões de CO₂ e da redução da quantidade de matérias-primas necessárias para a sua fabricação (MEYER, 2009). A utilização de adições permite ainda que sejam obtidas diminuições no custo final dos produtos, além de possibilitar um destino para os rejeitos industriais, contribuindo, desta forma, para o desenvolvimento sustentável (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com Silva (2010), os benefícios obtidos através da utilização de adições minerais nas indústrias de cimento e de concreto podem ser derivados em três grandes categorias, sendo elas os benefícios funcionais ou de engenharia, os benefícios econômicos e os benefícios ecológicos.

Atualmente, os cimentos com adições possuem uma participação expressiva no mercado brasileiro, sendo que o meio técnico já não tem mais dúvidas e predisposições contrárias ao emprego destes tipos de cimentos, isto devido à maior durabilidade proporcionada, mantidas as demais propriedades, além do crescimento da resistência à compressão ao longo do tempo, mesmo após a idade de controle de 28 dias (BATTAGIN; BATTAGIN, 2010). Além do aumento na resistência final e impermeabilidade devido ao refinamento dos poros, o uso de adições minerais no concreto inclui melhor resistência à fissuração térmica, devido ao baixo calor de hidratação, fortalecimento da zona de transição na interface, além de uma durabilidade muito maior com relação ao ataque por sulfatos e à expansão decorrente da reação álcali-agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os benefícios funcionais ou de engenharia podem ser obtidos tanto no estado fresco do concreto quanto após o endurecimento. A incorporação de partículas finamente divididas à matriz cimentícia tende a trazer melhoras na trabalhabilidade e estabilidade da mistura, reduzindo a necessidade de água para determinada consistência (excluindo-se alguns materiais com elevada área superficial, por exemplo, a sílica ativa ou a cinza de casca de arroz) (MEHTA; MONTEIRO; 2014). De acordo com Neville (1997), uma provável razão para o surgimento do cimento Portland composto foi o seu menor custo de produção, além de, em certos aspectos, um melhor desempenho com relação ao cimento Portland convencional. Fatores ambientais relacionados à obtenção da matéria prima do cimento, assim como problemas de disposição final para os resíduos industriais, também incentivaram o desenvolvimento dos cimentos compostos.

2.2.1 Cimento Portland com pozolanas

São considerados pozolânicos os materiais silicosos ou silicoaluminosos que possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, formando compostos que possuem propriedades cimentícias (ABNT NBR 5736, 1999). Estas pozolanas podem ser naturais, como por exemplo, as cinzas de origem vulcânica e a terra diatomácea, ou originadas através de algum tipo de tratamento térmico ou na forma de subprodutos industriais, como a cinza volante, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e a argila calcinada (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Durante a hidratação do clínquer ocorre a liberação de hidróxido de cálcio, que reage com a pozolana, fazendo com que este material possa ser utilizado em combinação com o clínquer na fabricação do cimento. Ao se consumir o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) proveniente da hidratação dos silicatos de cálcio do cimento, através da reação pozolânica, forma-se mais silicato de cálcio hidratado (C-S-H), contribuindo assim para o refinamento da microestrutura do material e o aumento de sua resistência (NEVILLE, 1997).

Os materiais pozolânicos mais amplamente utilizados pela indústria cimenteira são apresentados a seguir:

- a) *pozolana natural* – material que apresenta propriedades pozolânicas por si só, sem a necessidade de tratamento especial para sua ativação, além da moagem. Podem ser materiais de origem ígnea (como cinzas e lavas

vulcânicas) ou de origem orgânica (através de formações de rochas sedimentares, constituídas por esqueletos de algas diatomáceas);

- b) *cinza volante* – material pozolânico finamente dividido, proveniente da queima de carvão mineral (pulverizado ou granulado) em centrais termelétricas;
- c) *argila calcinada* – material obtido através da calcinação e da moagem de determinadas argilas a temperaturas de 500 a 900°C (ABNT NBR 5736, 1999).

Algumas propriedades importantes fazem com que a cinza volante seja utilizada em cimentos compósitos, como, por exemplo, a atividade pozolânica obtida (TAYLOR, 1997). Entretanto, a reação pozolânica é mais lenta, o que torna necessário, para a obtenção de certa resistência aos 28 dias, uma menor relação a/c do que se fosse utilizado um cimento Portland sem adições.

A menos que as estruturas cristalinas dos minerais argilosos presentes sejam destruídas através de tratamento térmico, a argila e folhelhos não apresentam reatividade considerável com a cal. A atividade pozolânica do material normalmente se deve à estrutura amorfa ou desordenada dos aluminossilicatos da argila, resultantes do tratamento térmico (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.2.2 Cimento Portland com escória de alto forno

A utilização de adições minerais de escória de alto-forno ao cimento Portland se tornou realidade no Brasil a partir do início da década de 1980, quando da normatização do “Cimento Portland com Escória”, sendo este fato consolidado com a normatização do “Cimento Portland de Alto-Forno” (ABNT NBR 5735, 1991), com os teores limites de adição atingindo valores de 35 a 70%, em massa de cimento.

A escória de alto-forno é um subproduto obtido através do tratamento do minério de ferro em alto-forno, apresentando-se sob a forma granulada devido ao resfriamento brusco necessário no processo (ABNT NBR 5735, 1991). Estas escórias granulares são constituídas predominantemente por silicatos e alumino-silicatos de cálcio, tendo aparência similar à de uma areia natural com formas mais angulares, sendo que possuem excelentes propriedades hidráulicas, tendo a capacidade de reagir com a água desde que existam ativadores alcalinos na mistura para participarem como reagente (por exemplo Ca(OH)_2) (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A escória de alto-forno é gerada na forma líquida, em temperaturas entre 1350 e 1550°C, durante a produção de ferro fundido. Se submetida a um resfriamento lento, se apresenta na forma cristalizada, sendo um material sem propriedades cimentantes. Quando resfriada de forma suficientemente rápida, através da aspersão de jatos pressurizados de água, forma um material granular que, quando seco e moído, é chamado de escória granular de alto-forno (TAYLOR, 1997).

A escória de alto-forno possui composição mineralógica parecida com a do clínquer, sendo constituída principalmente por cálcio, magnésio, silício, alumínio e oxigênio, tornando compatível a sua utilização com o cimento para uma ampla faixa de proporcionamento. A sua ativação ocorre após a hidratação do cimento e da liberação do hidróxido de cálcio, que funciona como catalisador da reatividade e ativa as propriedades aglomerantes da escória. Desta forma, este material, antes tido como rejeito industrial, passou a integrar a composição do principal aglomerante da construção civil, possibilitando, além de ganhos econômicos no processo de produção, vantagens no aspecto energético, reduzindo ainda o impacto ambiental gerado através da extração de minérios. A utilização da escória de alto-forno como adição à moagem do clínquer com o gesso, respeitando certas proporções, proporcionou a obtenção de um tipo de cimento que, além de atender plenamente aos usos mais comuns, apresenta melhorias em algumas de suas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final (BATTAGIN; BATTAGIN, 2010).

Neste tipo de cimento, a escória reage de forma mais lenta, o que acarreta num desenvolvimento da resistência mais lento com o aumento na sua proporção. Para concretos com resistência idêntica aos 28 dias (*slump* de 100 mm), a substituição de um cimento Portland sem adições por um com 65% de escória, pode reduzir pela metade a resistência aos 2 dias. No entanto, aos 91 dias, o concreto contendo cimento com escória já apresenta resistência 12% superior ao concreto com cimento convencional (TAYLOR, 1997).

2.2.3 Cimento Portland com fíler

Os materiais carbonáticos finamente divididos, normalmente em partículas menores que as do cimento, são conhecidos como fíler calcário. A utilização destes materiais traz efeitos benéficos nas propriedades de concretos e argamassas, uma vez que os grãos ou partículas destes materiais moídos têm forma e dimensões adequadas para se alojarem entre os grãos ou partículas dos demais componentes do cimento, funcionando na forma de “lubrificante” (NEVILLE, 1997). São várias as propriedades aprimoradas com a utilização do

fíler em concretos e argamassas, tais como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade, exsudação e a tendência à fissuração.

Os fíleres são materiais inorgânicos, obtidos através da fina moagem de determinados agregados minerais de composição calcária, que apresentam teor mínimo de 85% de carbonato de cálcio, atuando principalmente, devido a sua granulometria apropriada, no aumento da fluidez de argamassas e concretos, além de diminuírem a permeabilidade, a capilaridade, etc. Portanto, estes materiais apresentam uma ação mais física, podendo também apresentar reatividade química com os aluminatos de cálcio, através da formação de carboaluminatos e substituindo parcialmente o papel do gesso (BATTAGIN; BATTAGIN, 2010).

Usualmente os fíleres são materiais inertes, no entanto, não é desvantajoso que apresentem propriedades hidráulicas ou de reações não prejudiciais com os produtos de hidratação da pasta de cimento. Uma vez que a ação dos fíleres é predominantemente física, eles devem apresentar compatibilidade com os cimentos que serão utilizados (NEVILLE, 1997).

2.3 MÉTODOS PARA CONTROLE DE QUALIDADE DO CONCRETO

De acordo com Helene e Terzian (1993), o controle de qualidade tem por objetivo garantir determinadas características, preestabelecidas em projeto, de um produto ou serviço. O controle de qualidade pode ser entendido como uma técnica que, geralmente através de recursos estatísticos, fornece informações fundamentais para manutenção de uma qualidade desejada, visando um custo mínimo possível.

Mesmo sendo um dos setores mais importantes da indústria, de forma geral, considerando o aspecto de controle de qualidade da produção, ainda é válida a afirmação de Helene e Terzian (1993) onde dizem que a indústria da construção civil aparece como uma indústria atrasada com relação às demais. São vários os aspectos que dificultam a existência de um rápido e eficiente aproveitamento das técnicas de controle de qualidade aplicadas em outros setores da indústria, entre eles: a dificuldade de automatização dos processos; o caráter itinerante, que dificulta a constância de condições de execução, matérias-primas e processos; a impossibilidade de produção de produtos em série, tornando-a numa indústria de produtos únicos.

Desperdício de materiais, baixa produtividade operacional e falhas de dosagem ou de moldagem são exemplos característicos de problemas reportados na utilização de

concretos, cujas principais causas decorrem da inadequação das suas propriedades ainda no estado fresco, com relação às suas demandas de aplicação (ROMANO et al., 2011). Contudo, a necessidade de adequação na trabalhabilidade dos concretos, normalmente obtida através do aumento do consumo de água e de cimento por unidade de volume, provocam desajustes secundários, como fissuração, retração diferenciada, permeabilidade elevada, alteração no módulo de elasticidade, além de outros.

A rápida avaliação da relação água/cimento do concreto no estado fresco é de grande valor, uma vez que, quando esta relação é controlada após a mistura, podem ser estimadas outras propriedades relacionadas ao material cimentício em questão, visto que esta exerce controle sobre a porosidade e, por consequência, sobre a resistência mecânica e à corrosão do concreto endurecido (NÄGELE; HILSDORF, 1980; WEI; LI, 2006). Com isto em mente, um método que permita a determinação da relação a/c no canteiro de obras, de forma rápida e confiável, seria uma ferramenta de grande utilidade no controle de qualidade do concreto.

O desempenho final de um concreto é bastante complexo, dependendo de variados fatores. O desenvolvimento sistemático da composição de um concreto deve garantir uma natureza reológica adequada às condições de aplicação, assim como as características microestruturais resultantes não afetem as propriedades desejadas no estado endurecido (ROMANO et. al, 2011).

2.3.1 Métodos utilizados

As técnicas de caracterização e de controle de qualidade do concreto têm um papel fundamental para a execução de estruturas que atendam aos requisitos de qualidade especificados, permitindo a adequação das propriedades dos materiais às demandas associadas às mais variadas aplicações, além do desempenho adequado no estado endurecido.

2.3.1.1 Ensaio de resistência à compressão

Para que sejam projetadas estruturas de concreto armado, o engenheiro projetista adota uma resistência característica à compressão para o concreto (f_{ck}), que é definida como valor de referência e utilizada como base de cálculo, estando associada a um determinado nível de confiança. Com o objetivo de verificar que a estrutura de concreto atenda aos requisitos de segurança, a partir do ponto de vista estrutural, esta resistência deve ser sistematicamente avaliada, demonstrada e registrada ao longo do processo construtivo,

devendo ser atingidos os valores de resistência pelo concreto da estrutura (HELENE; ANDRADE, 2010).

A normatização brasileira orienta para a execução de diversas etapas, na correta determinação da resistência à compressão dos concretos. A NBR NM 33 (ABNT, 1998) determina quais os procedimentos necessários para a coleta de amostras de concreto, definindo volumes a serem coletados, tanto para betoneiras estacionárias quanto para caminhões betoneira, para posterior moldagem dos corpos de prova.

A norma NBR 5738 (ABNT, 2015) orienta os procedimentos para a moldagem e posterior cura dos corpos de prova, podendo ser realizada por imersão em água ou em câmara úmida, através de condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar. Os corpos de prova devem ser cilíndricos, com relação diâmetro:altura de 1:2, sendo mais usualmente utilizados os de 10 cm de diâmetro por 20cm de altura.

Os procedimentos do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova são estabelecidos através da NBR 5739 (ABNT, 2007), que define os possíveis tratamentos que podem ser empregados no topo dos corpos de prova, as velocidades de carregamento, a umidade dos corpos de prova, assim como outras condições de ensaio que possam influenciar nos resultados obtidos.

De acordo com a NBR 12655 (2015), a amostragem do concreto para ensaios de resistência à compressão deve ser realizada dividindo-se a estrutura em lotes, sendo que de cada lote devem ser retiradas amostras, com número de exemplares de acordo com o tipo de controle. Consideram-se dois tipos de controle da resistência, um baseado no controle estatístico do concreto por amostragem parcial e outro no controle do concreto por amostragem total. No controle por amostragem parcial é prevista uma forma de cálculo do valor estimado da resistência característica ($f_{ck,est}$), do lote de concreto em estudo. Já para o controle por amostragem total, a análise da conformidade deve ser realizada em cada betonada.

De acordo com Helene e Terzian (1993), o valor da resistência à compressão característica é o valor adotado como referência para realização do dimensionamento da estrutura, devendo ser um valor único e bem definido. A partir de uma curva de distribuição normal, também conhecida como distribuição Gaussiana, é associado um determinado nível de confiança requerido para a resistência do concreto, normalmente de 95%, que permite definir o valor da resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}). Com isso, existe

uma probabilidade de que apenas 5% das amostras não atinjam o valor característico de resistência, ou seja, sejam inferiores ao valor de f_{ck} . Conforme a NBR 12655 (ABNT, 2015), a partir deste valor de f_{ck} a resistência de dosagem do concreto (f_{cj}) é obtida através da expressão $f_{cj}=f_{ck}+1,65.S_d$, onde S_d representa o desvio padrão da produção.

No entanto, os resultados obtidos através do ensaio de resistência à compressão, por si só, apresentam certa deficiência, uma vez que os resultados são obtidos apenas após o concreto atingir determinada idade e estão relacionados apenas à parcela amostrada. Consideráveis esforços foram aplicados para o desenvolvimento de um método mais rápido para determinação da resistência à compressão do concreto, como é o caso dos procedimentos de cura acelerada para determinação deste parâmetro. No entanto, estes esforços trouxeram apenas resultados parciais, no sentido de que a solução ideal seria o conhecimento da resistência potencial do concreto antes do seu lançamento nas fôrmas, ou, até mesmo, antes da sua descarga (POPOVICS; POPOVICS, 1998).

2.3.1.2 Ensaio de abatimento de tronco de cone

O ensaio de abatimento de tronco de cone (ou *slump test*) é um dos mais empregados na tecnologia de concretos, isto devido à sua grande simplicidade de execução. O teste consiste na medição direta do deslocamento vertical do topo do cone de concreto (Figura 1), logo após a retirada do molde, sendo que quanto maior essa medida, mais fluido será o material. O valor de abatimento é usualmente utilizado nas especificações de projeto do concreto, sendo que este é o ensaio de aceitação provisória mais utilizado no recebimento do concreto nas obras, determinado pela NM 67 (ABNT, 1998). A simplicidade de realização do ensaio e sua capacidade em detectar variações na uniformidade de uma mistura particular de concreto, de proporções nominais, são responsáveis por sua utilização difundida.



Figura 1 – Ensaio de abatimento de tronco de cone.

Este ensaio é um teste de fluxo livre, uma vez que o material flui devido ao seu peso próprio, sem nenhum tipo de confinamento, em decorrência da força gravitacional. A viscosidade (η) e a tensão de escoamento (τ) são duas grandezas básicas que definem o comportamento dos fluidos, sendo também aplicadas ao concreto no estado fresco. A primeira é a constante de proporcionalidade que relaciona a taxa com a tensão de cisalhamento aplicada, já a segunda indica a tensão mínima necessária para o início do escoamento (ROMANO et al., 2011).

O ensaio de abatimento de tronco de cone não é apropriado para determinar a consistência de concretos muito fluidos ou muito secos. O método permite, de uma forma simples, um controle da uniformidade do processo de produção do concreto, pois são detectadas variações nos resultados do ensaio decorrentes de mudanças na dosagem da mistura, na granulometria do agregado ou no teor de água do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A relação água/cimento de uma mistura de concreto é usualmente “avaliada” a partir da consistência obtida através do ensaio, embora seja reconhecido que esta relação não é direta. Além disso, com o advento dos aditivos superplastificantes, foi possível a produção de misturas de concreto “trabalháveis” para relações a/c mais baixas. Isto faz com que seja muito difícil, senão impossível, determinar se a consistência obtida pela amostra de concreto, no momento do seu recebimento, é decorrente apenas do uso do aditivo superplastificantes ou do uso de uma quantidade de água acima da especificada (KOELIKER et al., 1994).

Em grande parte das especificações para concretos utilizados em obra, tanto a relação água/cimento quanto o *slump* são indicados com o objetivo de garantir a resistência e

a trabalhabilidade desejadas para o concreto *in loco* (NANTUNG, 1998). Na prática, apenas o ensaio de *slump* é realizado. Em muitos casos, concretos com a mesma relação água/cimento podem apresentar valores de abatimento por *slump* completamente diferentes, da mesma forma que concretos com um mesmo abatimento podem ter relações a/c bastante distintas.

Outro ensaio, menos comum de ser utilizado, com o objetivo também de mensurar a consistência do concreto no estado fresco, é o ensaio de espalhamento na mesa de Graff, sendo o método de ensaio definido pela NBR 15823-2 (ABNT, 2010). Este ensaio é mais comumente utilizado para avaliar concretos fluidos, sendo o seu princípio idêntico ao do abatimento, diferindo apenas para o valor da consistência, que é a média aritmética do diâmetro obtido pela amostra após a retirada do molde metálico.

Seja para concretos produzidos por empresas terceirizadas ou em obra, o resultado do ensaio de abatimento de tronco de cone é, ainda, o parâmetro mais utilizado na aceitação, ou rejeição, do material empregado na estrutura. Um dos maiores problemas deste tipo de ensaio é que está diretamente relacionado à trabalhabilidade do concreto, e não, efetivamente, à relação a/c ou à resistência à compressão do material (MANCIO et al., 2010). Com isso, é validada a possibilidade de lançamento do concreto, sem serem conhecidas as características de resistência potencial e de durabilidade apresentadas pelo concreto, que, na realidade, são as mais importantes para garantir a qualidade e a durabilidade da estrutura.

2.3.2 Métodos para determinação da relação água/cimento

Atualmente existe uma variada gama de métodos, que serão detalhados a seguir, com o objetivo de determinar a relação água/cimento de materiais cimentícios, mas a sua determinação instantânea através de medição *in situ* continua como um desafio ainda não resolvido. Esta lacuna tem motivado engenheiros e pesquisadores nas últimas décadas, fazendo com que um grande número de estudos sejam realizados na exploração de métodos para determinação da relação água/cimento de concretos (XIAO et al., 2012).

Uma vez que a relação a/c do concreto é um indicador direto de qualidade da mistura, a necessidade de se obter este parâmetro surge em situações em que se torna desejável examinar as condições originais de mistura, algumas vezes já no estado endurecido (WONG; BUENFELD, 2009).

Existem variados métodos para determinação da relação água/cimento do concreto no estado endurecido. Através da utilização da teoria da microscopia por fluorescência óptica, Jakobsen et al. (2000) correlacionaram a relação a/c à intensidade de fluorescência de

amostras impregnadas com uma resina epóxi (ou corante) fluorescente, o que levou ao desenvolvimento do método Nordtest (NT Build 361-1999, 1999). Já Sahu et al. (2004), assim como Wong e Buenfeld (2009), utilizaram o método de microscopia eletrônica de varredura (MEV) por retroespalhamento de elétrons e análise de imagens, para quantificar a composição de amostras de pastas de cimento e de concreto no estado endurecido. Além destes, alguns métodos não-destrutivos já foram apresentados como alternativa na avaliação da relação água/cimento do concreto no estado endurecido. Como é o caso do método de reflexão de micro-ondas (BOIS et al., 1998; BOIS et al., 2000) e do método de ondas acústico-utrassônicas (PHILIPPIDIS; AGGELIS, 2003). Em um estudo utilizando o método de ondas acústico-utrassônicas, Philippidis e Aggelis (2003) avaliaram a capacidade do método para estimar a relação água/cimento em concretos. Foram analisadas variadas relações água/cimento e amostras com idades de 2 a 90 dias. Os resultados obtidos foram satisfatórios e o algoritmo introduzido foi capaz de determinar valores corretos de relação água/cimento em mais de 90% dos testes realizados.

Sahu et al. (2004) desenvolveram um método com o objetivo de determinar a relação água/cimento do concreto endurecido, baseado na microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons retroespalhados. O método é baseado na impregnação de epóxi por vácuo, em seções de amostras de concreto, e o seu polimento até atingir uma superfície lisa. Durante o processo de impregnação das amostras secas de concreto, o epóxi preenche os poros capilares, fendas e vazios. Nestas imagens, os poros impregnados por epóxi aparecem escuros, enquanto que outras fases aparecem mais claras. As áreas selecionadas possuem dimensões de 109 x 109 μm , e as ampliações das imagens são de 800 vezes. Os pontos escuros, que correspondem aos vazios capilares, podem ser separados dos componentes sólidos da pasta de cimento, baseando-se na intensidade da retrodispersão. Através da utilização de 40 imagens por amostra como média, foi observado que existe uma relação linear entre a porcentagem média geral de poros nos quadros e a relação água/cimento dos concretos de referência para as diferentes relações água/cimento analisadas, no intervalo de 0,40 a 0,80.

Com o objetivo de controlar a qualidade do concreto de forma adequada durante o andamento da obra, os métodos para determinação da relação a/c do concreto fresco são preferíveis, sendo estes classificados em duas categorias (XIAO et al, 2012). Um é baseado na medição direta das quantidades de água e de cimento contidas na amostra, já o outro, baseia-se na medição de uma propriedade física específica, podendo esta ser correlacionada com a

relação a/c, o que possibilita a sua estimativa. Os métodos de determinação direta incluem o método de micro-ondas (NAGI, WITHING, 1994; NANTUNG, 1998; DOWEL, CRAMER, 2002; BESCHER et al., 2004), o método do dispositivo nuclear desenvolvido pela *Troxler Electronic Laboratories* (DOWELL; CRAMER, 2002; HITEC, 1996), o método da flotação (NÄGELE; HILSDORF, 1980) e o método de titulação química (HOWDYSHELL, 1977 apud XIAO et al., 2012; LAWRENCE 1984). Já, entre os métodos de determinação indireta da relação a/c, estão o de pulsos ultrassônicos (POPOVICS; POPOVICS, 1998; PHILIPPIDIS; AGGELIS, 2003), o de turbidez (KOELIKER et al., 1994; FOX et al., 2007), o do equipamento reflectômetro (ALI et al., 2010), o método da flutuação (BLAUTH, 1972 apud NAIK; RAMME, 1989; NAIK; RAMME, 1989) e o da resistividade elétrica (MACDONALD; NORTHWOOD, 1999; MANCHIRYAL; NEITHALATH, 2009; MANCIO et al., 2010). Uma breve descrição destes métodos é realizada na sequência.

O *U.S. Army Corps of Engineers* (HOWDYSHELL, 1977 apud MANCIO et al., 2010; HOWDYSHELL, 1977 apud XIAO et al., 2012; LAWRENCE, 1984) desenvolveu uma técnica baseada na titulação de cloretos e de cálcio, com o objetivo de determinar a quantidade de água e de cimento do concreto no estado fresco. O dispositivo desenvolvido, com nome de *USA-CERL Concrete Quality Monitor* (CQM – Monitor de Qualidade do Concreto), era utilizado com a premissa de que a água no concreto fresco está disponível para mistura com uma solução aquosa, com concentração de cloretos e volume conhecidos, adicionada à mistura. O volume de água pode ser determinado a partir da medição da concentração de cloretos na amostra misturada, sem considerar as frações absorvidas pelos agregados e pelo cimento. Já a quantidade de cimento é determinada a partir do peneiramento de uma quantidade definida de concreto, através da circulação de um volume de água conhecido, que possibilita a separação do cimento lavado dos agregados. É realizada, então, a análise de uma mostra representativa da mistura de água-cimento, através da dissolução do cálcio contido no cimento com a aplicação de ácido nítrico, sendo a concentração de cimento determinada a partir da quantidade de cálcio na solução, baseando-se em curvas de quantidade de cálcio no cimento previamente determinadas. Os resultados obtidos indicaram um desvio padrão na ordem de 5% a 6%, tanto para a determinação do cimento, quanto para da água. No entanto, muitos fatores influenciam na quantidade de cálcio no concreto, o que acaba exercendo certa influência na precisão do método.

No método do forno de micro-ondas, talvez um dos métodos mais práticos já experimentados, uma amostra de concreto no estado fresco é pesada e então aquecida em um

forno de micro-ondas, com o objetivo de evaporar a água contida na mistura. A diferença de massas entre a amostra seca e úmida permite a obtenção do percentual de água, e a relação água cimento pode ser obtida a partir da combinação com a quantidade de cimento especificada na mistura (DOWEL; CRAMER, 2002; MANCIO et al., 2010). Desde a década de 1970, as agências de estradas de rodagem têm reconhecido a necessidade de testes que possam estimar a relação água/cimento no concreto fresco. A partir do Programa de Pesquisas Estratégicas de Estradas (*Strategic Highway Research Program – SHRP*), a técnica de secagem pela utilização do forno de micro-ondas recebeu melhoras do processo original, passando de tempos de ensaio de 60 minutos para cerca de 15 minutos, além de resultados com precisão suficiente para considerá-lo uma ferramenta de controle de qualidade (NANTUNG, 1998).

O *North Dakota State Highway Department* foi um dos primeiros a desenvolver uma técnica utilizando forno de micro-ondas para determinação gravimétrica do conteúdo de água na mistura. Os erros médios declarados foram de aproximadamente 1,8 kg/m³. O método desenvolvido era simples e de baixo custo, no entanto era muito lento para ser utilizado em aplicações de campo (NAGI, WHITING, 1994). Nos seus experimentos, foram obtidos teores de recuperação de água da mistura na ordem de 91%. Foi observado que o teor de absorção dos agregados utilizados não afeta no percentual de recuperação de água das misturas de concreto, enquanto que a quantidade de agregados graúdos na amostragem diminui este percentual de recuperação. Maiores quantidades de agregados graúdos na mistura de concreto foram indicadas como fonte de erro na determinação do seu teor de água, utilizando o método do forno de micro-ondas.

O método de micro-ondas é relativamente simples, mas possui algumas limitações importantes, uma vez que seus ensaios de determinação da quantidade de água levam entre 15 e 30 minutos para serem realizados, além de preocupações com relação à segurança devido à presença de metais em alguns tipos de agregado (NAGI, WITHING, 1994; DOWEL, CRAMER, 2002).

Bescher et al. (2004) verificaram a capacidade do método de secagem por radiação com micro-ondas, utilizando 2.45 GHz de frequência, na determinação da relação água/cimento de concretos de rápido tempo de pega inicial (concretos com sulfoaluminato de cálcio). Neste tipo de ensaio deve ser dada atenção para todos os ingredientes acrescentados na mistura, uma vez que as substâncias voláteis são completamente removidas da mistura. A

precisão obtida para as estimativas das relações água cimento foi de ± 0.01 , em laboratório, e de ± 0.03 , para os ensaios em campo.

Em 1980, Nägele e Hilsdorf (1980), através da separação dos componentes do concreto por flotação, obtiveram determinações rápidas e precisas para determinação da quantidade de cimento do concreto no estado fresco. O método da flotação, originalmente utilizado na indústria de mineração para separação da parte valiosa do minério de ferro, consiste na suspensão de partículas sólidas em água, através da reação seletiva com componentes particulares da mistura. Substâncias de ativação de superfície (coletores) são adicionadas à mistura de concreto com água, reagindo seletivamente com componentes particulares e tornando-os hidrofóbicos. Através da injeção de ar no meio, as partículas hidrofóbicas se aderem às bolhas de ar, emergindo para a superfície, podendo ser facilmente removidas, enquanto que as partículas não-hidrofóbicas continuam em suspensão. Os resultados são obtidos num intervalo de tempo de cerca de 20 minutos. O método da flotação não é sensível a diferentes formas e tamanhos de partículas, assim como não é afetado pelo tipo de cimento ou pela temperatura. No entanto, diferentes agregados apresentam variadas propriedades de flotação, o que pode gerar leves superestimativas nas quantidades de cimento.

O dispositivo Troxler para determinação da relação água/cimento, Modelo 4430, foi introduzido em 1993 pela *Troxler Electronic Laboratory* (DOWELL; CRAMER, 2002; XIAO et al., 2012, HITEC, 1996, XIAO et al., 2012), que utiliza de tecnologia nuclear para indiretamente obter as quantidades de água e de cimento no concreto fresco. O dispositivo é composto basicamente de duas sondas (uma para determinação da quantidade de cimento e a outra para determinação da quantidade de água), uma unidade de controle computacional e um recipiente para colocação da amostra. A determinação da quantidade de água é realizada através da contagem de nêutrons termalizados pelo hidrogênio no interior da amostra de concreto, sendo que a maior parte do hidrogênio está contida na água. Já a determinação da quantidade de cimento é realizada a partir da medição da absorção de fótons pela amostra. As sondas são inseridas no interior da amostra durante a medição, sendo que o processo para obtenção dos resultados leva cerca de quatro minutos. Foram obtidas ótimas aproximações, tanto para determinação da quantidade de água, quanto para determinação da relação a/c. É necessária a obtenção da curva de calibração para os materiais específicos utilizados no projeto, antes da realização das medições. Além disso, apenas operadores com treinamento profissional e com licenças que atendam aos regulamentos de segurança à radiação podem utilizar o dispositivo, o que restringe drasticamente a sua aplicação.

Popovics e Popovics (1998) exploraram diferentes métodos através da aplicação de pulsos ultrassônicos em argamassas e concretos, no estado fresco e logo após o seu endurecimento, para determinação instantânea da sua relação água/cimento. Foram avaliados diferentes equipamentos e métodos ultrassônicos, rápidas mudanças no estado físico (estado fresco para sólido) antes da realização das medições, a produção de pulsos ultrassônicos de alta intensidade (com o objetivo de superar as fortes atenuações do concreto fresco), assim como a intensificação dos pulsos ultrassônicos, através do contato direto dos transdutores com a amostra. Nenhum dos métodos avaliados obteve resultados satisfatórios na determinação instantânea e direta da relação a/c. Philipphidis e Aggelis (2003) realizaram testes de ultrassom com pastas de cimentos endurecidas e no estado fresco, concentrando-se na influência da variação da relação a/c sobre a propagação das ondas geradas, onde perceberam que maiores quantidades de água resultaram em maiores quantidades de energia das ondas transmitidas. Os autores consideraram promissores os resultados obtidos, sendo sugeridos mais estudos sobre o método.

Koeliker et al. (1994), através de um estudo com o *Kansas Department of Transportation*, deram continuidade ao trabalho de Bavelja (1970³ *apud* MANCIO et al., 2010; FOX et al., 2007; XIAO et al., 2012), através do peneiramento pressurizado de amostras de concreto no estado fresco e, com a utilização de um turbidímetro, correlacionaram a turbidez da solução passante com a relação água/cimento. O medidor Kansas de relação a/c é um equipamento eletromecânico, constituído basicamente por um turbidímetro, uma série de peneiras com 305 mm de diâmetro, um sistema de distribuição de água (para lavar completamente as amostras de concreto), uma repartição com o objetivo de evitar redemoinhos, uma bomba e tubos flexíveis, para passagem dos fluídos e controle das válvulas. Embora a turbidez não seja uma medição quantitativa direta das partículas suspensas, a turbidez aumenta à medida que existam mais partículas suspensas na água, o que permite a correlação das leituras de turbidez com a relação a/c, a partir da pasta de cimento separada da mistura. Os resultados obtidos apontaram para uma precisão de ± 0.01 na determinação da relação água/cimento, num teste único e com um intervalo de 90% de certeza. No entanto, os testes levavam em torno de 10 minutos cada, com a necessidade da limpeza do equipamento em cada execução do ensaio. Além disso, de acordo com Fox et al. (2007), o método é bastante sensível na determinação da quantidade de cimento e pouco

³ Bavelja, R., "A Rapid Method for the Wet Analysis of Fresh Concrete, *Concrete*, V. 4, No. 9, pp. 351-353.

sensível à quantidade de água, fazendo com que seja um bom indicador apenas da massa de cimento da mistura, ao invés da relação a/c.

Ali et al. (2010) desenvolveram um equipamento reflectômetro, com o objetivo de correlacionar o coeficiente de reflexão de micro-ondas, obtido para pastas de cimento no estado fresco, com a relação água/cimento. Através da inserção de uma sonda (antena monopolar) no interior da amostra, acoplada a um dispositivo composto por oscilador, circulador e detector, e da emissão de ondas em frequências apropriadas, é possível obter os coeficientes de reflexão do concreto, que são então correlacionados com as relações água/cimento. O dispositivo foi desenvolvido com o objetivo de determinar a relação a/c através de medições em tempo real, realizadas *in loco*. No entanto, resultados mais específicos não foram divulgados.

O método da flutuação (ou impulsão) permite a rápida determinação da relação água/cimento do concreto no estado fresco, a partir do princípio de Arquimedes, que diz que um corpo, completamente ou parcialmente imerso em um fluido, é impulsionado para cima com uma força igual à da massa do fluido deslocada pelo corpo (NAIK; RAMME, 1989). Para utilização do método, é necessário o conhecimento de alguns parâmetros, como a massa específica do cimento e dos agregados, assim como a relação agregados/cimento em massa. O método da flutuação é baseado na pesquisa de Thaulow (BLAUTH, 1972 apud NAIK; RAMME, 1989; XIAO et al., 2012), desenvolvida nos anos 30. A massa de uma amostra de concreto imersa em água, livre de ar, deve ser igual ao somatório das massas submersas dos componentes individuais do concreto fresco. Neste caso, a massa de água, submersa, é igual a zero. Com isso, a massa de uma amostra de concreto, livre de ar, submersa em água será igual ao somatório das massas dos agregados e do cimento, submersos. O método da flutuação é rápido, simples de ser executado, de baixo custo e executável no canteiro de obras. No entanto, de acordo com estudos realizados (NAIK; RAMME, 1989), este método é bastante dependente da precisão dos valores de massa específica e absorção dos materiais. Os valores de massa específica dos agregados devem ter uma precisão de ± 0.01 para garantir resultados de relação a/c com um nível de confiança de 97%, e de ± 0.02 para um nível de confiança de 94%.

Apesar das inúmeras tentativas realizadas na busca por um método que permita a determinação prática e precisa da relação a/c, nenhum dos métodos apresentados obteve uma aceitação difundida por parte dos usuários no canteiro de obras. O método da resistividade elétrica surge como uma interessante alternativa na determinação da resistência à compressão do concreto, ainda no estado fresco, para as idades desejadas. A partir das curvas da

elaboração das curvas de correlação (curvas de calibração) é possível realizar a estimativa de outras propriedades mecânicas do concreto desejadas, como, por exemplo, a resistência à compressão, bastando realizar os ensaios de calibração. A seguir são apresentados os princípios do método da resistividade elétrica, utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

2.3.3 O método da resistividade elétrica

Os testes de resistividade elétrica aplicados ao solo tornaram-se amplamente utilizados nos campos geotécnico e geoambiental, devido à sua natureza não-destrutiva, rapidez de execução e por se tratar de um método de baixo custo efetivo (HAMMAD, 2013). As medições de resistividade elétrica são consideradas uma ferramenta apropriada na investigação de propriedades de solos naturais ou tratados, sejam elas mecânicas, hidráulicas ou de deformação (HASSANEIN et al., 1996).

Um método, ou dispositivo, que possa quantificar com precisão a resistividade elétrica do concreto no estado fresco torna possível a correlação desta resistividade com a proporção de íons de cimento dissolvidos e, assim, a determinação da relação água/cimento do concreto e a sua resistência final esperada (MANCIO et al., 2010).

A Lei de Archie (ARCHIE, 1942; MORRISON, 2004) é frequentemente utilizada para descrever empiricamente a resistividade elétrica de materiais geológicos porosos (ρ_b), em função da resistividade do fluido (ρ_f) e da porosidade (ϕ), sendo descrita através da Equação 2.

$$F = \frac{\rho_b}{\rho_f} = aS^{-c}\phi^{-m} \quad \text{Equação 2}$$

Aqui, F é um fator de formação (adimensional) que é obtido através da razão entre a resistividade elétrica global da massa de concreto fresco (ρ_b) pela resistividade elétrica do fluido do poro (ρ_f), a é um coeficiente de tortuosidade, S é o grau de saturação, m é um coeficiente do cimento, c é um coeficiente de ajuste (c geralmente entre 4 e 5 e m variando entre 1,5 a 4,4). Os dois fatores, a e m , são considerados constantes empíricas covariantes, uma vez que não são variáveis independentes (WEI, 2004).

Para a análise de matrizes cimentícias no estado fresco, o valor de S é igual a 1 (o concreto no estado fresco é considerado uma solução completamente saturada). Com isso, a Equação 2 pode ser transformada na Equação 3, apresentada a seguir.

$$\rho_b = \frac{\rho_f}{a\phi^m}$$

Equação 3

A resistividade elétrica de materiais cimentícios é baseada na condução iônica através dos poros capilares preenchidos com a solução aquosa. Assim como descrito na Equação 3, os fatores que controlam a resistividade elétrica do meio poroso são a porosidade e a condutividade da solução aquosa (WEI; LI, 2006).

Entre os fatores que influenciam a porosidade de uma matriz cimentícia, no estado endurecido, estão relação água/cimento, as adições minerais e químicas utilizadas, os componentes do cimento, o estágio de hidratação (tempo de cura), a proporção dos agregados, as condições de compactação, assim com as condições de cura. Entretanto, no estado fresco, a porosidade da mistura, completamente saturada, corresponde simplesmente ao teor de água utilizado.

A resistividade elétrica ρ (ou o seu inverso, a condutividade σ) dos materiais cimentícios é diretamente dependente da porosidade, da salinidade da solução líquida e da umidade disponível (TASHIRO et al., 1987). A resistividade elétrica da pasta de cimento, em uma condição saturada, depende das proporções volumétricas relativas da matriz cimentícia e da água livre. Para a ocorrência da condução, os caminhos da água, assim como os poros capilares, devem ser contínuos na direção da condução. A mobilidade dos íons na solução do poro de pastas de cimento endurecidas é sensível à distribuição e ao volume dos poros saturados e o grau de saturação dos capilares é dependente da água contida.

De acordo com Wei e Li (2006), para uma solução saturada no estado fresco, como é o caso de amostras cimentícias, o volume da fase líquida pode ser igualado à porosidade, uma vez que os poros estão totalmente preenchidos com a solução líquida.

A primeira tentativa para estabelecer uma correlação entre a relação água/cimento e a resistividade elétrica do concreto no estado fresco, foi realizada por MacDonald e Northwood (2000), mas os autores não obtiveram resultados promissores. Amostras de concreto fresco foram peneiradas através de uma peneira n° 4 (4.75 mm), sendo os ensaios de resistividade elétrica realizados com a fração de argamassa do concreto. Após terem sido peneiradas, as amostras de argamassa fresca foram dispostas em recipientes cilíndricos e em um equipamento de medição de bancada. Ainda que a dimensão dos agregados tenha sido mantida praticamente constante para as diferentes amostras de argamassa testadas, a quantidade de água das amostras e, por consequência, a consistência obtida, variaram

significativamente entre si. A análise dos resultados obtidos pelos autores permite identificar que as variações nos valores de resistividade elétrica foram causadas, principalmente, devido às mudanças na porosidade das amostras, que é aproximadamente igual à quantidade de água no estado fresco, e não apresenta alterações para amostras de concreto com diferentes relações a/c (MANCIO et al., 2010).

Estudos de resistividade feitos apenas com pasta de cimento, da mesma forma, não se aplicam ao concreto. O concreto e a pasta de cimento são materiais significativamente diferentes, em especial quanto à influência da relação água/cimento na resistividade global da amostra no estado fresco. A relação direta observada para amostra de concreto no estado fresco, obtida entre a resistividade elétrica e a relação a/c, para uma dada consistência e em função da resistividade da solução do poro, é diferente da relação obtida para amostras de pasta de cimento. No caso de pastas de cimento, a resistividade é inversamente proporcional à relação a/c, uma vez que, de acordo com a Lei de Archie (Equação 3), quando realizadas variações na relação a/c, a resistividade global é influenciada principalmente pela variação na quantidade de água da amostra, ou seja, a sua “porosidade”, e não apenas pela resistividade da solução do poro (WEI; LI, 2006; MANCIO et al, 2010).

De fato, como já foi verificado por Lyse (1932), para uma determinada consistência (*slump*), diferentes misturas de concreto podem possuir a mesma quantidade de água por unidade de volume, independente da relação a/c que tenha sido aplicada, escolhida em função da resistência à compressão desejada. Com isso, mantendo-se as quantidades de água fixas para um mesmo cimento (varia-se a quantidade de cimento para alterar os valores de a/c), para consistências semelhantes, as amostras de concreto apresentam aproximadamente a mesma “porosidade”, uma vez que, no estado fresco, na forma de solução saturada, a porosidade do concreto é igual à quantidade de água acrescentada e ao ar incorporado na mistura. Isto faz com que a quantidade de fluido do poro seja praticamente constante para variadas misturas, sendo que quaisquer alterações causadas na resistividade elétrica das amostras devem ser atribuídas às características da solução do poro (MANCIO et al., 2010).

Vários estudos foram realizados sobre o princípio do processo de hidratação de pastas com cimento Portland com base no método da resistividade (WEI, 2004; WEI; LI, 2006; XIAO, LI, 2008; WEI et al., 2010; ZUO; WEI, 2013; ZUO et al., 2014), através da utilização de um aparato de resistividade elétrica sem contato (LI; LI; 2003). Para este dispositivo, a pasta de cimento é lançada dentro de um molde com formato de anel e seção

transversal retangular, sendo o fluxo da corrente elétrica induzido à amostra a partir de um transformador externo (Figura 2).

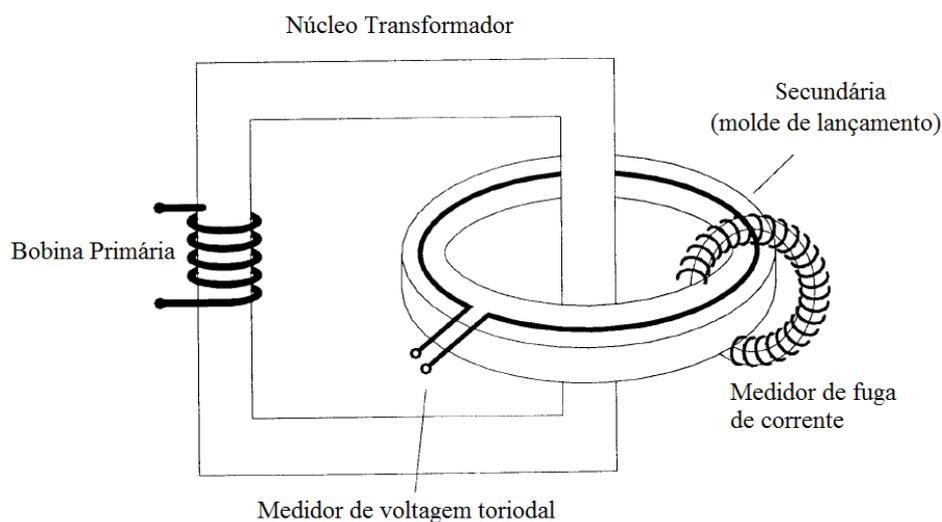


Figura 2 – Croqui esquemático do dispositivo de resistividade elétrica sem contato.

Fonte: Adaptado de Wei (2004)

Wei e Li (2006) realizaram a determinação da resistividade elétrica global de amostras de pastas de cimento confeccionadas para diferentes relações a/c, assim como a resistividade elétrica da solução do poro, obtida a partir de soluções extraídas das pastas de cimento por filtragem a vácuo. A partir de seus resultados, os autores sugerem que as medições de resistividade elétrica possam ser utilizadas na determinação da relação a/c, assim como para determinação do tempo (ou estágio) de pega das amostras, uma vez que os diferentes estágios da hidratação foram identificados a partir do método. Ainda, segundo os autores, a curva de resistividade no tempo, durante a hidratação, é controlada pela resistividade elétrica da solução do poro e pela porosidade, ocasionada pela variação dos íons dissolvidos, pela ocorrência de períodos de indução e pela diminuição dos poros depois destes períodos.

Hansson et al. (1983⁴ apud WEI, 2004) avaliaram a resistividade elétrica obtida por quatro tipos diferentes de cimentos, através de dispositivos AC (*alternate current* – corrente alternada) e DC (*direct current* – corrente contínua). As resistividades elétricas obtidas apresentaram distintas dependências com relação às idades estudadas, sendo que estas diferenças não puderam ser explicadas com relação às suas composições e relações

⁴ Hanson, I. L. H., Hanson, C. M., 1983, Electrical resistivity measurements of Portland cement based materials. Cement and Concrete Research, Vol 13, No 5, pp 675-683.

água/cimento. Eles também perceberam que o comportamento da resistividade elétrica em pastas de cimento é similar ao desenvolvimento da resistência à compressão.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), o cimento é composto por clínquer pulverizado e sulfato de cálcio (gipsita). Já o clínquer é um composto que consiste, essencialmente, de silicatos de cálcio e aluminatos (C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF). No momento da adição da água ao cimento, os seus compostos à base de cálcio se dissolvem e dissipam espécies iônicas na solução. Esta solução iônica porosa confere ao concreto no estado fresco uma propriedade de resistividade característica, sendo este o princípio fundamental do método da resistividade elétrica do concreto (MANCIO et al., 2010).

De acordo com Wei (2004), quando a água é adicionada ao cimento, ocorre a dissolução de íons contidos no cimento, dando origem a vários íons livres na mistura, incluindo potássio (K^+), íons hidroxila (OH^-), sódio (Na^+), sulfatos (SO_4^{2-}), cálcio (Ca^{2+}), íons silicatos e íons aluminatos, que favorecem a condutividade da matriz solúvel nos períodos iniciais da hidratação. Afirma, ainda, que a concentração dos íons K^+ e Na^+ depende do conteúdo de sulfatos alcalinos no cimento, da relação a/c aplicada e do tipo de cimento, sendo que estes íons não atingem facilmente um estado de saturação da amostra. Os íons de Ca^{2+} , OH^- , Al e Si são lançados na solução devido à dissolução do calcário e dos silicatos tricálcico e dicálcico. Contudo, os íons dominantes na solução do poro em pastas de cimento são OH^- , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} e SO_4^{2-} , uma vez que as concentrações de Si e Al na solução do poro são muito baixas. Durante este período de dissolução, ocorre um aumento na concentração de íons na mistura e, por consequência, a diminuição da resistividade elétrica. Na Figura 3 podem ser vistas as curvas de resistividade elétrica e de concentração dos principais íons contidos na solução aquosa da pasta (S-P) de cimento, durante os 180 minutos iniciais após a mistura, para a relação a/c de 0.40, obtidas através de análises termogravimétricas.

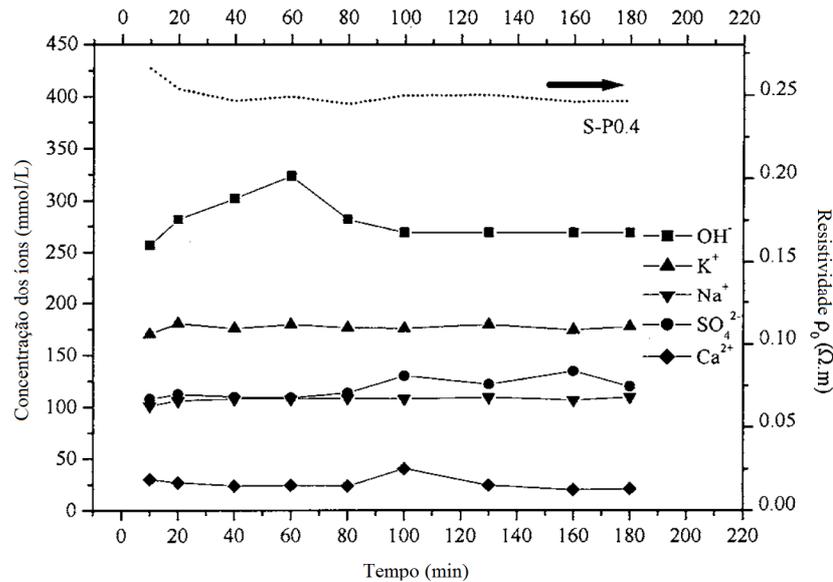


Figura 3 – Concentração dos íons e resistividade elétrica para a solução da pasta com a/c de 0.4.

Fonte: Adaptado de Wei e Li (2006)

Para baixas concentrações ($c \leq 0,01$ mol/L), a condutividade equivalente é praticamente constante, e a condutividade da solução segue uma regra proporcional à concentração. No entanto, para altas concentrações, a condutividade equivalente diminui consideravelmente com o aumento da concentração (WEI; LI, 2006). De acordo com Taylor (1997), a concentração dos íons hidroxila (OH^-) fica geralmente no intervalo de 0,1 a 1,0 mol/L. Com isso, para realizar estimativas precisas da condutividade da solução, é necessário realizar também estimativas precisas desta dependência com relação à concentração. A condutividade equivalente (λ°) de espécies iônicas, para uma diluição infinita, é função apenas da temperatura, sendo os valores dos principais íons da solução do poro apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Condutividade equivalente dos principais íons da solução do poro para diluição infinita a 25°C.

Íon	Espécie	$z\lambda^\circ$ (S.cm ² /mol)
Cátions	K^+	73,5
	Na^+	50,1
	Ca^{2+}	59,0
Ânions	OH^-	198,0
	SO_4^{2-}	79,0

Fonte: Wei e Li (2006).

A Figura 4 apresenta a estimativa da contribuição dos principais íons dissolvidos na solução aquosa de pastas (S-P) de cimento para as relações a/c de 0.3, 0.35 e 0.40, obtidas a partir do peneiramento das amostras por filtragem a vácuo (WEI; LI, 2006).

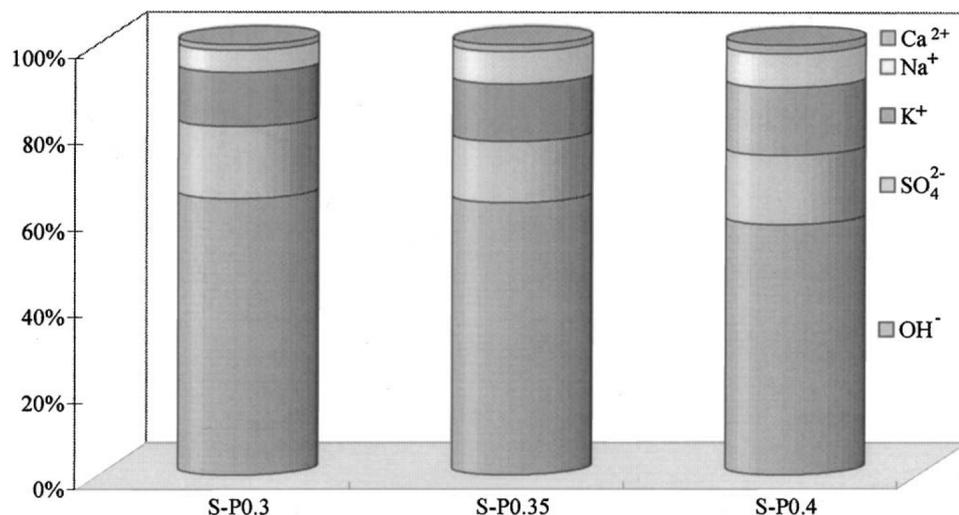


Figura 4 – Contribuição dos íons na condutividade elétrica na solução do poro com 1 hora.

Fonte: Wei e Li (2006)

A partir dos dados da Figura 4, observa-se que a principal contribuição na condutividade elétrica é obtida a partir dos íons de hidroxila, sendo este resultado devido à maior concentração dos íons OH^- nas amostras das soluções (60 – 80%), assim como a maior condutividade equivalente deste íon, de $198 \text{ S.cm}^2/\text{mol}$.

A resistividade da solução líquida (ou solução do poro) diminui com o aumento de temperatura, isto devido ao aumento da mobilidade dos íons na solução causado pela temperatura. Este comportamento nas soluções líquidas é o oposto do comportamento em condutores metálicos (eletrônicos), onde a resistividade aumenta com a elevação da temperatura (MORRISON et al., 2004).

Manchiryal e Neithalath (2009) obtiveram resultados importantes com relação à influência dos materiais na condutividade elétrica de pastas de cimento e de concretos, durante o estágio inicial de hidratação e após o endurecimento. Com relação às amostras no estado fresco, foram investigadas diferentes relações *a/c*, a presença de cinza volante em substituição ao cimento, assim como a influência da dimensão dos agregados e da variação na relação “agregados totais/materiais cimentantes”. As amostras ensaiadas foram dispostas em um recipiente de acrílico, com duas placas de aço inoxidável, utilizadas como eletrodos, acopladas às suas extremidades. As medições de impedância foram realizadas através de um dispositivo analisador de ganho de fase Solartron 1260TM, com frequências de 0,1 Hz a 1 MHz e com um sinal AC de 250 mV. Com relação aos resultados, foi observado que:

- a) a influência do tipo de cimento na resistividade elétrica pode ser atribuída à dimensão das partículas de cimento, uma vez que o cimento mais fino testado (com

maior superfície específica) apresentou uma maior superfície para reação, acarretando em menores valores de condutividade elétrica;

- b) tanto as pastas de cimento quanto as amostras de concreto, sem substituição de cimento por cinza volante, apresentaram maiores resultados de condutividade elétrica, em comparação às amostras com 20% de substituição, em massa, por cinzas. Este comportamento foi atribuído, primeiramente, à redução na quantidade de íons livres contidos na solução do poro, causados pela diminuição na quantidade de cimento em substituição pela cinza. Outro fator considerado foi a menor superfície específica da cinza volante em comparação ao cimento, o que leva a um maior volume necessário de cinza para repor a mesma quantidade em massa do cimento e, conseqüentemente, um menor volume efetivo de poros nos estágios iniciais;
- c) como a fração do volume do concreto responsável pela condutividade é reduzida com o a adição de agregados à mistura (pasta de cimento), reduções nos valores de condutividade elétrica foram obtidas para os concretos com maior quantidade de agregados. Este foi o fator que obteve maior influência sobre a variável condutividade inicial. Cabe ressaltar que, neste caso, houve também uma diminuição na quantidade de água na mistura, o que leva a uma diminuição da “porosidade” no estado fresco, elevando a resistividade conforme a Lei de Archie;
- d) para uma relação “agregados totais/materiais cimentantes” fixa, a influência da dimensão do agregado não foi significativa;
- e) para uma relação de “agregados totais/materiais cimentantes” igual a 5 (mais agregados do que pasta), o aumento na relação a/c acarretou em uma sensível redução na condutividade elétrica inicial. Já para uma relação “agregados totais/materiais cimentantes” igual a 3, os valores de condutividade iniciais foram superiores e, com o aumento da relação a/c, foram obtidos resultados de condutividade ainda maiores.

Apesar dos resultados apresentados anteriormente, que sugeriram existir uma relação direta entre a relação água/materiais cimentícios e a sua resistividade elétrica, foi através dos estudos realizados por Mancio et al. (2010) que se tornou possível o desenvolvimento de uma metodologia aplicável ao controle de qualidade do concreto.

Em seus estudos, Mancio et al. (2010) desenvolveram um novo método e equipamento, baseado no método da resistividade elétrica, com o objetivo de determinar de forma prática e precisa, o valor da relação água/cimento de amostras de concreto no estado fresco. O método é baseado nas medições de resistividade elétrica, através da inserção de uma sonda no interior da amostra de concreto no estado fresco. Conhecidas as correlações entre os valores de resistividade elétrica e de relação a/c, torna-se possível realizar as estimativas deste fator, de forma instantânea.

Os autores avaliaram a aplicação do método na estimativa de valores de relação a/c de concretos confeccionados de acordo com o método de dosagem ACI 211.1 (1991), para três distintas relações a/c (0,30, 0,40, 0,50 e 0,60) e variaram o teor de cinza volante em substituição ao cimento (0 e 25%). Os resultados obtidos apresentaram uma forte correlação direta entre a resistividade elétrica do concreto fresco e a relação água/aglomerante utilizada, com valores médios das estimativas dentro do intervalo de $\pm 0,01$ dos valores efetivos das misturas testadas (MANCIO et al., 2010). De acordo com o esquema apresentado na Figura 5, multímetros foram conectados em paralelo com o resistor de resistência conhecida (R_o) e com os eletrodos centrais (M e N), mostrando a queda de voltagem correspondente pela passagem através destes elementos (V_o e V_c , respectivamente). No esquema apresentado (Figura 5 –b), os elementos A , M , N e B representam os eletrodos da sonda, igualmente espaçados (entre eixos) por uma distância a , onde a corrente I_o flui dos eletrodos B para A .

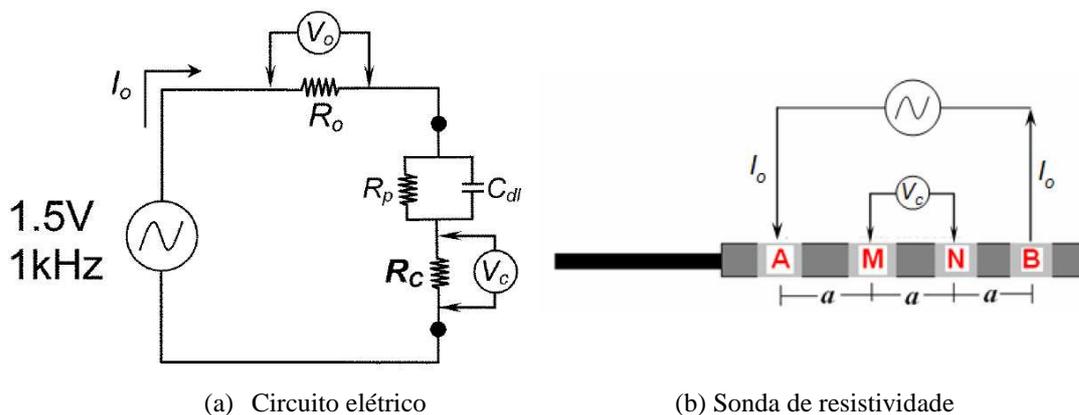


Figura 5 – Esquema ilustrado do circuito elétrico do experimento e da sonda de resistividade elétrica.

Fonte: Mancio et al. (2010)

No esquema apresentado (Figura 5 – a), V_o e V_c representam as quedas de potenciais obtidas através da leitura nos multímetros, no resistor e no interior do concreto, respectivamente. R_c representa a resistência do eletrólito, neste caso, a resistência do concreto. A resistência de interface (também conhecida como resistência de polarização) é representada

por R_p , enquanto que a capacitância em paralelo (C_{dl}) representa a capacitância de dupla-camada. Estes dois últimos representam o caminho oferecido à corrente, através do concreto e da interface entre a sonda e a amostra. De acordo com Mancio et al. (2004), estes são os três principais componentes físicos responsáveis pela impedância medida em um elemento.

A Figura 6 apresenta o Gráfico de Nyquist, que expressa a influência da frequência da onda gerada sobre o módulo de impedância e o ângulo de fase.

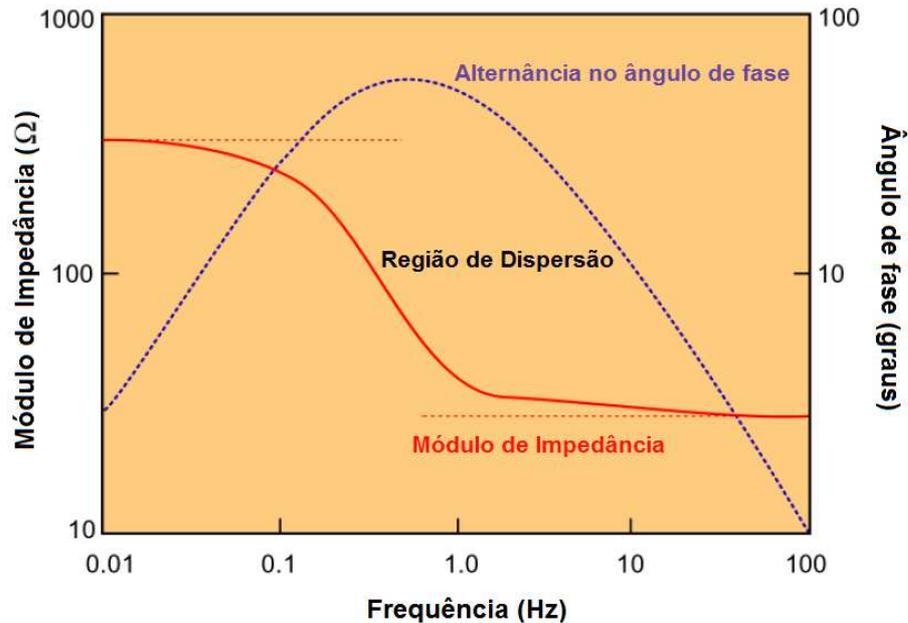


Figura 6 – Gráfico de Nyquist.

Fonte: Adaptada pelo autor (MANCIO et al., 2004)

Com o aumento da frequência, ocorre a diminuição do módulo de impedância, resultado da diminuição dos efeitos da resistência de interface e da capacitância. Neste caso, o valor atribuído à medição é influenciado, principalmente, pela resistência efetiva da amostra. Com o objetivo de minimizar os efeitos de impedância nas medições, ou seja, os efeitos de resistência de interface e de capacitância, foi atribuída uma frequência de 1.000 Hz (1 KHz) ao experimento.

A corrente que passa por I_o é dada por V_o/R_o , já a resistência elétrica da amostra de concreto fresco (R_c) é dada por V_o/I_o . A resistividade do concreto (ρ_c) é uma propriedade do material, que independe da geometria da amostra, sendo dada a partir da Equação 4.

$$\rho_c = k \times R_c$$

Equação 4

Onde:

ρ_c = resistividade da amostra de concreto ($\Omega.m$);

k = fator geométrico da sonda (parâmetro determinado a partir da geometria da sonda);

R_c = resistência elétrica da amostra de concreto (Ω).

Apesar dos resultados promissores encontrados, não existe nenhum tipo de sonda ou dispositivo, baseada no modelo proposto por Mancio et al. (2010), disponível para comercialização no mercado, seja a nível nacional ou internacional. Além disso, os aparelhos para medição de condutividade, disponíveis para comercialização, não permitem a obtenção de valores representativos com relação à amostra de concreto, uma vez que a estrutura dos dispositivos, que contém os eletrodos, não possui dimensões suficientes para a sua aplicação em concretos. Já os medidores de superfície baseados no arranjo de Wenner, utilizados para determinação da resistividade de amostras de concreto endurecidas, permitem apenas a medição através de uma das superfícies da amostra, que podem sofrer interferências decorrentes da exsudação da água de amassamento e da segregação, o que torna as medições não representativas. Isto faz com que seja necessário, antes da realização da pesquisa, o desenvolvimento de um novo equipamento, de acordo com o proposto pelos autores. Uma vez realizado o desenvolvimento do equipamento e a sua respectiva calibração, é possível a sua utilização para realização das medições de resistividade.

2.3.3.1 Determinação analítica do fator geométrico k

De acordo com Mancio et al. (2010), o fator geométrico k é uma constante que depende exclusivamente da geometria da sonda utilizada nas medições de resistividade elétrica, devendo ser calculado apenas uma vez, durante o estágio de desenvolvimento do equipamento. A seguir é descrito o método utilizado para obtenção deste fator de forma analítica, podendo este ser obtido também de forma empírica. O método para determinação empírica do fator geométrico k é apresentado em 3.2.2.

A determinação teórica do fator geométrico k permite a verificação do valor obtido empiricamente. Segundo Morrison et al. (2004), a integração da equação do potencial de uma corrente elétrica fluindo através de uma esfera e da taxa de mudança no ponto de injeção de carga com o tempo (Equação 5), são o ponto inicial para a utilização do método da resistividade (a equação foi desenvolvida inicialmente para uma superfície de solo).

$$\int_s \vec{J} \cdot d\vec{S} = -\frac{d}{dt} \int \rho dV$$

Equação 5

Através da solução da Equação 5, aplicada a uma superfície esférica no entorno da fonte da corrente I , pode-se obter a Equação 6.

$$I = J \times 4\pi r^2 \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

J = densidade da corrente;

$4\pi r^2$ = área da superfície de todo espaço esférico.

A superfície correspondente ao espaço esférico pode ser relacionada à amostra de concreto fresco ou à solução aquosa de cloreto de sódio, por exemplo. A Figura 7 apresenta um esquema gráfico da relação entre a fonte de corrente e a superfície esférica.

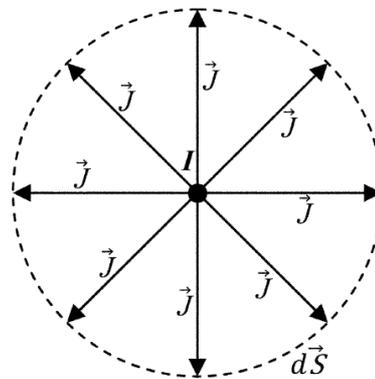


Figura 7 – Fonte de corrente em um espaço esférico.

Fonte: Mancio et al. (2010)

Uma vez que a condutividade elétrica ($\sigma = 1/\rho$) é definida como a razão entre a densidade de corrente (J) e o campo elétrico (E), e, considerando que o campo elétrico em um ponto é igual ao valor negativo do gradiente do potencial elétrico ϕ , a Equação 6 pode ser reescrita de acordo com a Equação 7.

$$I = \sigma E \cdot 4\pi r^2 = \sigma \cdot (-\nabla \phi) \cdot 4\pi r^2 \quad \text{Equação 7}$$

Na Equação 7, ϕ é um valor escalar que representa o potencial elétrico em um ponto isolado. Através da expressão do gradiente do potencial elétrico em coordenadas esféricas ($\nabla \phi = d\phi/dr$) e da integral da expressão resultante, o potencial elétrico em um ponto na superfície esférica (ϕ) pode ser expresso em função da corrente I , da resistividade ρ e do raio r da superfície, de acordo com a Equação 8.

$$\phi = \frac{I}{\sigma \cdot 4\pi r} + C = \frac{I \cdot \sigma}{4\pi r} + C$$

Equação 8

Entretanto, é possível mensurar o potencial elétrico apenas como uma diferença entre dois pontos distintos. No caso da sonda utilizada, o potencial elétrico em cada um dos dois eletrodos interiores é um reflexo da corrente que flui a partir dos dois eletrodos externos. Desta forma, de acordo com o esquema apresentado na Figura 8, sendo os eletrodos externos identificados como A e B e os internos como M e N, e estando estes igualmente espaçados por uma distância a , o potencial no eletrodo M, por exemplo, é dado como a diferença entre os potenciais dos dois eletrodos externos (A e B), com distâncias de a e $2a$, respectivamente, a partir de M.

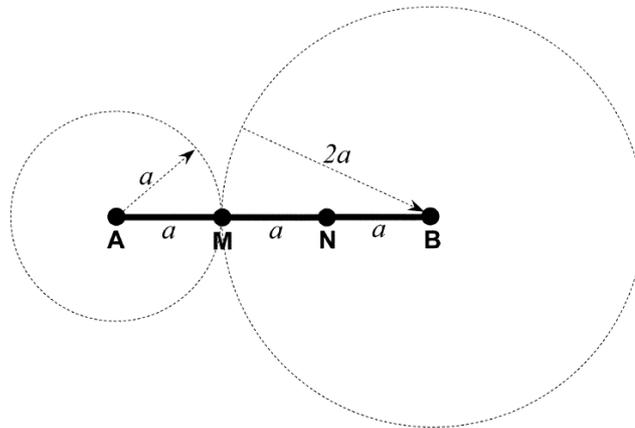


Figura 8 – O potencial elétrico medido no eletrodo M é obtido através da diferença entre os potenciais individuais nos eletrodos A e B.

Fonte: Mancio et al. (2010)

Com isso, o potencial elétrico em M (ϕ_M) pode ser dado pela Equação 9.

$$\phi_M = \frac{I_A \rho}{4\pi a} - \frac{I_B \rho}{4\pi(2a)}$$

Equação 9

Da mesma forma, o potencial no eletrodo N será expresso através da Equação 10.

$$\phi_N = \frac{I_A \rho}{4\pi(2a)} - \frac{I_B \rho}{4\pi a}$$

Equação 10

Considerando que a corrente que passa através do eletrodo A é a mesma corrente através do eletrodo B ($I_A = I_B = I$) e, subtraindo-se os dois potenciais ($\phi_M - \phi_N$), tem-se como

resultado a diferença de potencial (V) para os dois eletrodos internos, de acordo com a Equação 11.

$$V = \frac{I \cdot \rho}{4\pi a} \quad \text{Equação 11}$$

Através da resolução desta expressão em função da resistividade (ρ) é revelada a expressão teórica para o fator geométrico (k), mostrado na Equação 12.

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot (4\pi a) = \frac{V}{I} \cdot (k) \quad \text{Equação 12}$$

Portanto, para uma distância entre eletrodos (a) de 0,0254 m (1 pol.), o fator geométrico (k) da sonda deve ser de 0,319 (Equação 13).

$$k = 4\pi a = 4\pi \cdot (0,0254m) = 0,319 \quad \text{Equação 13}$$

Com isso, conhecendo-se o espaçamento entre os eletrodos (a) e a corrente elétrica (I) injetada através da sonda, a resistividade do material pode ser obtida diretamente através da medição da voltagem nos dois eletrodos internos.

As etapas de aplicação do método da resistividade elétrica, desenvolvido por Mancio et al. (2010) e utilizado neste trabalho, assim como do desenvolvimento e calibração empírica da sonda desenvolvida, são descritas nos métodos experimentais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

O trabalho experimental desenvolvido foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, durante os meses de setembro a dezembro de 2014 e de janeiro a fevereiro de 2015.

Este procedimento experimental foi elaborado com o objetivo de avaliar a capacidade do método da resistividade na determinação da relação água/cimento de concretos no estado fresco, confeccionados com diferentes tipos de cimentos normalizados, que possibilita a determinação instantânea deste parâmetro *in loco*. Os cimentos utilizados foram os normalizados brasileiros. Um equipamento utilizado para realização dos ensaios de resistividade foi confeccionado e otimizado, de acordo com os parâmetros desenvolvidos por Mancio et al. (2010).

A Figura 9 apresenta um fluxograma com as atividades desenvolvidas durante a pesquisa.

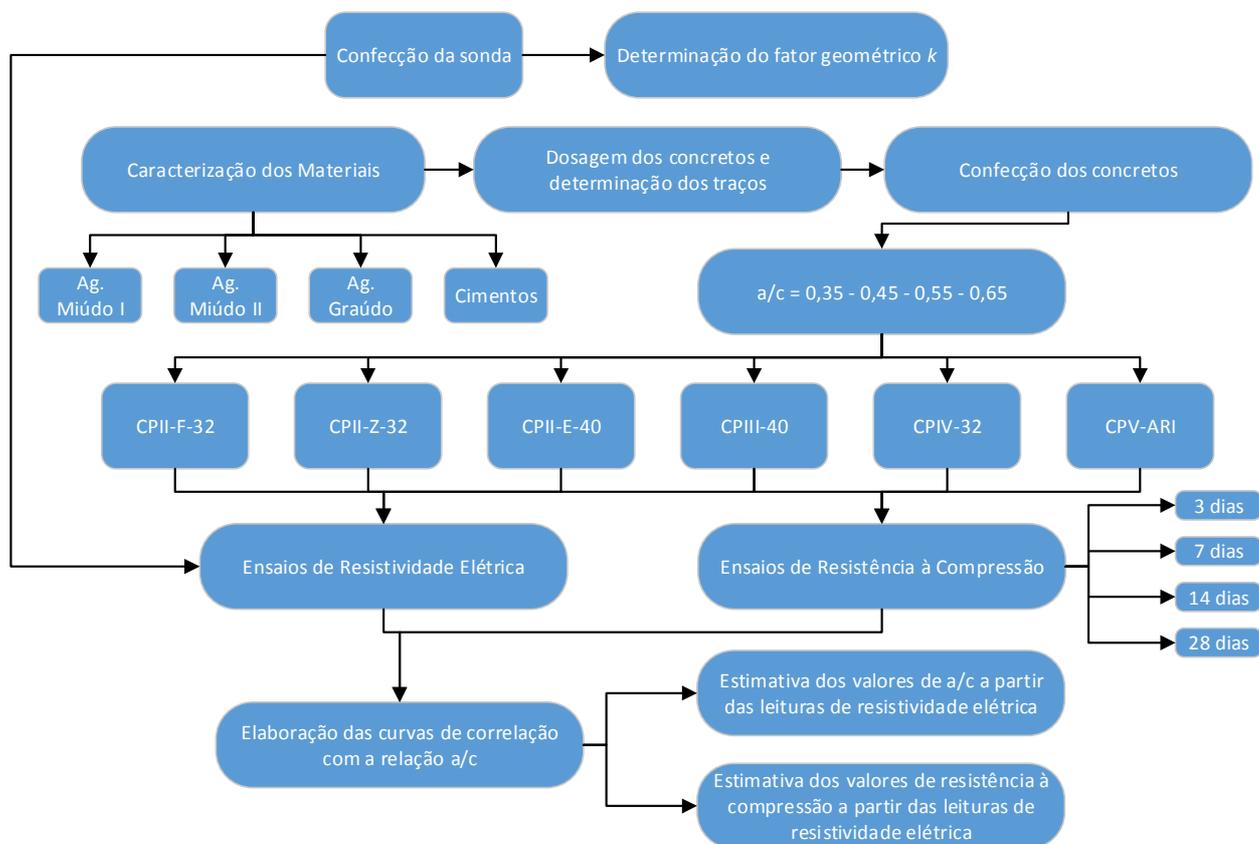


Figura 9 – Fluxograma com as etapas no desenvolvimento da pesquisa.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para confecção dos concretos utilizados nos testes de resistividade elétrica e na moldagem dos corpos de prova, foram utilizados cimentos produzidos no Brasil e agregados disponíveis na região do Vale dos Sinos. Os materiais utilizados na confecção dos corpos de prova estão descritos e caracterizados na sequência.

3.1.1 Cimento Portland

Os cimentos utilizados nos experimentos foram escolhidos em função de atenderem às normas brasileiras em vigência e por estarem disponíveis para comercialização no mercado nacional, no momento da realização da pesquisa. Neste trabalho, as amostras de cimento tiveram origem de um único lote de fornecimento. Os cimentos utilizados estão apresentados a seguir:

- a) Cimento Portland Composto com Pozolana (CPII-Z-32);
- b) Cimento Portland Composto com Fíler (CPII-F-32);
- c) Cimento Portland Composto com Escória (CPII-E-40);
- d) Cimento Portland de Alto Forno (CPIII-40);
- e) Cimento Portland Pozolânico (CPIV-32);
- f) Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI).

A Tabela 3 apresenta as características químicas, físicas e mecânicas dos cimentos utilizados na pesquisa, tendo sido informadas pelos fabricantes. Os dados de massa específica foram determinados em laboratório, a partir da técnica de picnometria, conforme o Manual de Densidade (SARTORIUS, 1999), utilizando picnômetro de vidro de 25 mL.

Tabela 3 – Características físicas, mecânicas e químicas dos cimentos utilizados.

Tipo de cimento		CPII-F-32	CPII-Z-32	CPII-E-40	CPIII-40	CPIV-32	CPV-ARI	
Análise Física	Peneira # 200 (% retida)	1,80	0,51	0,35	0,19	0,27	0,01	
	Peneira # 325 (% retida)	10,80	7,23	1,09	2,81	2,45	0,15	
	Superf. Espec. Blaine (cm ² /g)	3.710	4.048	3.906	4.020	4.680	4.540	
	Massa Específica (g/cm ³)*	3,14	3,04	3,17	3,05	2,89	3,05	
	Água de consistência da pasta (%)	27,6	28,5	28,6	30,6	31,3	31,3	
	Início de pega (h:min)	03:00	04:00	03:00	04:00	04:00	02:20	
	Fim de pega (h:min)	04:45	04:45	04:00	05:15	04:45	03:10	
Análise Mecânica	Resistência à compressão axial (MPa)	01 dia	14,9	14,7	-	-	-	30,9
		03 dias	28,6	25,3	34,0	21,9	22,0	41,7
		07 dias	32,5	29,7	41,1	35,9	26,6	47,0
		28 dias	37,2	36,1	49,9	51,0	36,3	54,6
Análise Química (%)	Perda ao fogo - PF	4,12	5,43	2,93	3,21	3,68	3,93	
	Resíduos Insolúveis - RI	2,04	14,03	0,36	0,83	32,51	0,84	
	MgO	1,39	5,45	5,87	5,10	4,64	1,46	
	SO ₃	2,89	2,77	3,38	1,43	2,35	2,63	

* Determinado em laboratório com a utilização de picnômetro.

A Tabela 4 apresenta a caracterização química dos cimentos utilizados, obtida a partir da técnica de Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (ED-XRF), com a utilização de Espectrômetro modelo EDX 720 HS, da marca Shimadzu.

Tabela 4 – Características químicas dos cimentos utilizados.

Tipo de cimento	CPII-F-32	CPII-Z-32	CPII-E-40	CPIII-40	CPIV-32	CPV-ARI
CaO	61,209	48,045	59,139	51,064	36,603	64,907
SiO ₂	18,352	22,465	20,966	26,106	30,964	20,107
Al ₂ O ₃	4,263	7,415	5,020	7,096	12,284	4,941
Fe ₂ O ₃	2,967	2,829	2,303	1,793	3,677	2,366
SO ₃	2,896	2,891	2,373	2,714	1,974	2,262
Na ₂ O	1,243	0,161	0,795	0,161	0,161	1,996
K ₂ O	1,227	1,246	0,815	0,628	1,299	0,955
MgO	1,220	4,716	5,928	5,718	4,230	1,150
SrO	0,332	0,231	0,062	0,080	0,149	0,213
TiO ₂	0,179	0,349	0,207	0,272	0,591	0,191
P ₂ O ₅	0,140	0,098	0,113	0,101	0,052	0,173
MnO	0,065	0,105	0,253	0,625	0,081	0,108
Cr ₂ O ₃	0,007	0,009	0,007	0,011	0,016	0,004
ZnO	0,006	0,046	0,003	0,004	0,034	0,006
Perda ao fogo - PF	4,670	5,600	3,500	2,320	0,040	5,110

3.1.2 Agregado Miúdo

Na confecção dos concretos foram utilizados dois tipos de agregado miúdo, com o objetivo de melhorar as propriedades de empacotamento e de distribuição granulométrica, e, como consequência, minimizar os efeitos de segregação e de exsudação do concreto. Os agregados miúdos são descritos nos próximos itens.

3.1.2.1 Agregado Miúdo I

Para a confecção dos concretos utilizou-se areia de origem quartzosa, sendo classificada segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), como fora da zona utilizável. Para a sua caracterização foram utilizados os seguintes ensaios: determinação da composição granulométrica - NM 248 (ABNT, 2003); determinação da massa unitária - NM 45 (ABNT, 2006); e determinação da massa específica - NM 52 (ABNT, 2009). As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados de caracterização do agregado miúdo I. A Figura 10 apresenta a curva granulométrica obtida em termos de porcentagem retida acumulada.

Tabela 5 – Valores de porcentagem retida acumulada do agregado miúdo I.

Peneira (mm)	% Retida Acumulada										
	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,51	12,7	19,0
Areia I	100	93	43	14	4	1	0	0	0	0	0

Tabela 6 – Características físicas do agregado miúdo I.

Determinação	Valores obtidos	Método utilizado
Módulo de Finura	1,55	NBR NM-248
Dimensão máxima característica (mm)	1.19	NBR NM-248
Massa específica (g/cm ³)	2,58	NBR NM-52
Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	2,57	NBR NM-52
Massa específica do agregado saturado com superfície seca (g/cm ³)	2,57	NBR NM-52
Massa unitária (g/cm ³)	1,41	NBR NM-45

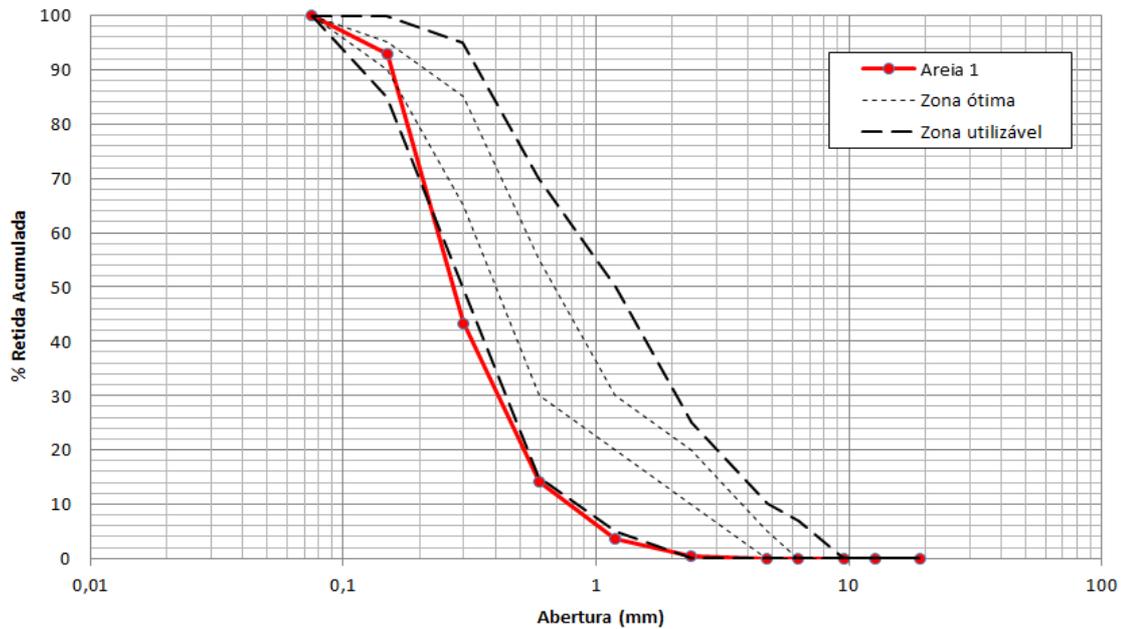


Figura 10 – Curva granulométrica do agregado miúdo I.

3.1.2.2 Agregado Miúdo II

Na elaboração dos concretos utilizou-se areia de origem quartzosa, sendo classificada segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), como dentro da zona utilizável. Para este tipo de agregado miúdo foram realizados os mesmos ensaios descritos para o agregado miúdo I. São apresentados nas Tabelas 7 e 8 a caracterização física deste agregado miúdo, e na Figura 11, a sua curva granulométrica em termos de percentagem retida acumulada.

Tabela 7 – Valores de percentagem retida acumulada do agregado miúdo II.

Peneira (mm)	% Retida Acumulada											
	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,51	12,7	19,0	25,4
Areia II	100	100	94	59	25	9	2	0	0	0	0	0

Tabela 8 – Características físicas do agregado miúdo II.

Determinação	Valores obtidos	Método utilizado
Módulo de Finura	2,89	NBR NM-248
Dimensão máxima característica (mm)	4,76	NBR NM-248
Massa específica (g/cm ³)	2,58	NBR NM-52
Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	2,54	NBR NM-52
Massa específica do agregado saturado com superfície seca (g/cm ³)	2,56	NBR NM-52
Massa unitária (g/cm ³)	1,60	NBR NM-45

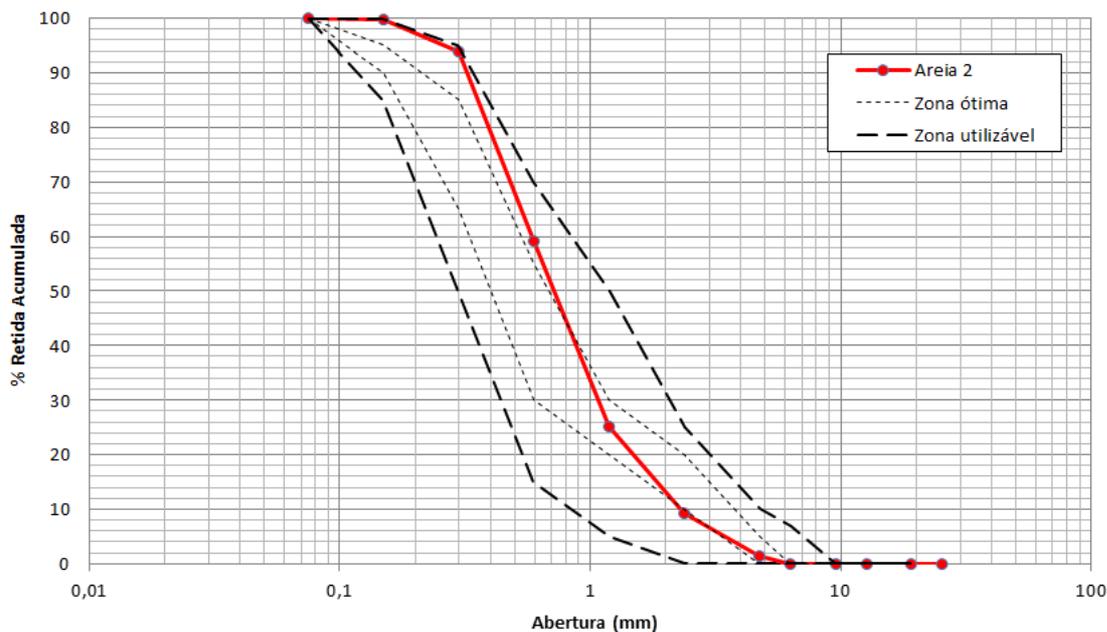


Figura 11 – Curva granulométrica do agregado miúdo II.

3.1.2.3 Agregado Miúdo Empacotado

Como foram utilizados dois tipos de agregado miúdo na mistura estudada, foi realizado um ensaio de empacotamento das areias, através da determinação da massa unitária das amostras (ABNT NM 45, 2006), variando-se o teor das areias em intervalos de estudo de 10%, em massa. Os teores testados, assim como os respectivos valores de massa unitária, estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultado de empacotamento dos agregados miúdos.

Teor do agregado em massa (%)		Massa Unitária (g/cm ³)
Agregado Miúdo I	Agregado Miúdo II	
0,0	100,0	1,57
10,0	90,0	1,61
20,0	80,0	1,62
30,0	70,0	1,62
40,0	60,0	1,63
50,0	50,0	1,62
60,0	40,0	1,60
70,0	30,0	1,59
80,0	20,0	1,57
90,0	10,0	1,54
100,0	0,0	1,51

A proporção que forneceu a maior massa unitária (1,63 g/cm³) foi aplicada para os demais traços, com o objetivo de se obter menores sintomas de exsudação e

segregação nas misturas de concreto, tendo uma composição de 40% do agregado miúdo I e de 60% do agregado miúdo II. A Tabela 10 e a Figura 12 apresentam a curva granulométrica do agregado miúdo obtido em termos de percentagem retida acumulada, após a determinação do ensaio de empacotamento.

Tabela 10 – Valores de percentagem retida acumulada do agregado miúdo empacotado.

Peneira (mm)	% Retida Acumulada										
	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,51	12,7	19,0
Areia empacotada	100	97	74	41	17	6	1	0	0	0	0

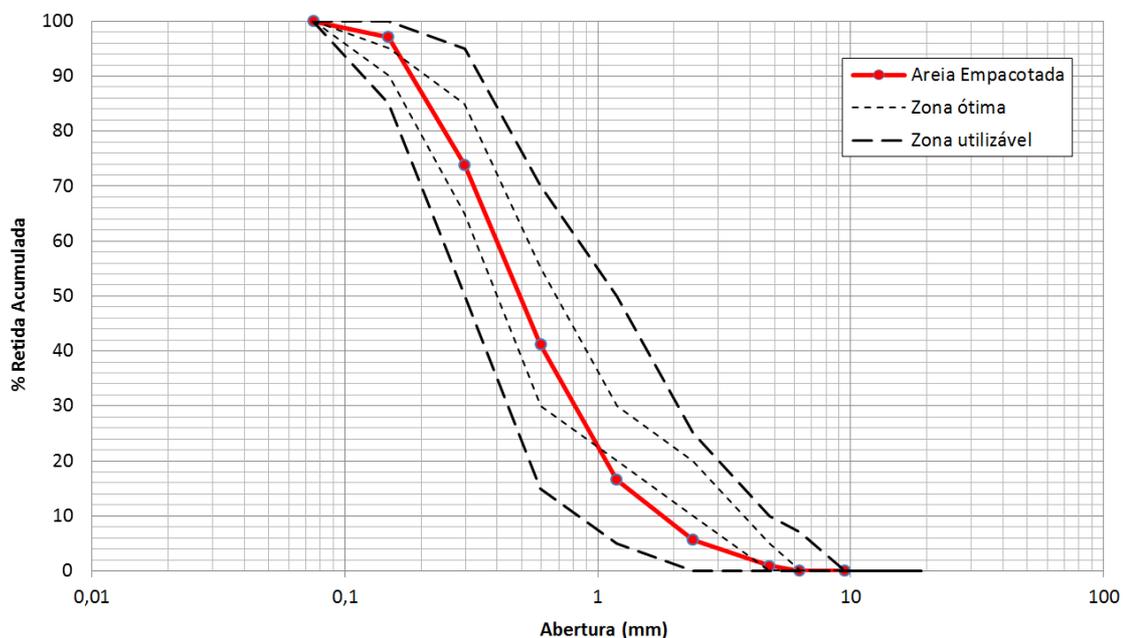


Figura 12 – Curva granulométrica do agregado miúdo empacotado.

3.1.3 Agregado Graúdo

Foi utilizada, na confecção dos concretos, brita de origem basáltica, lavada e seca em estufa. Os limites da curva granulométrica do agregado graúdo utilizado enquadram-se na zona granulométrica "9,5/25" (menor e maior dimensões do agregado graúdo), de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009). Para a sua caracterização foram utilizados os seguintes ensaios: determinação da composição granulométrica - NM 248 (ABNT, 2003); determinação da massa unitária - NM 45 (ABNT, 2006); e determinação da massa específica - NM 53 (ABNT, 2009). Apresentam-se nas Tabelas 11 e 12 a caracterização física da brita utilizada e na Figura 13, a sua curva granulométrica.

Tabela 11 – Valores de porcentagem retida acumulada do agregado graúdo.

Peneira (mm)	% Retida Acumulada											
	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,35	9,52	12,7	19,1	25,4
Brita	100	100	100	100	100	100	100	99	93	67	10	1

Tabela 12 – Características físicas do agregado graúdo.

Determinação	Valores obtidos	Método utilizado
Módulo de Finura	7,01	NBR NM-248
Dimensão máxima característica (mm)	25,4	NBR NM-248
Massa específica (g/cm ³)	2,67	NBR NM-53
Massa unitária (g/cm ³)	1,31	NBR NM-45

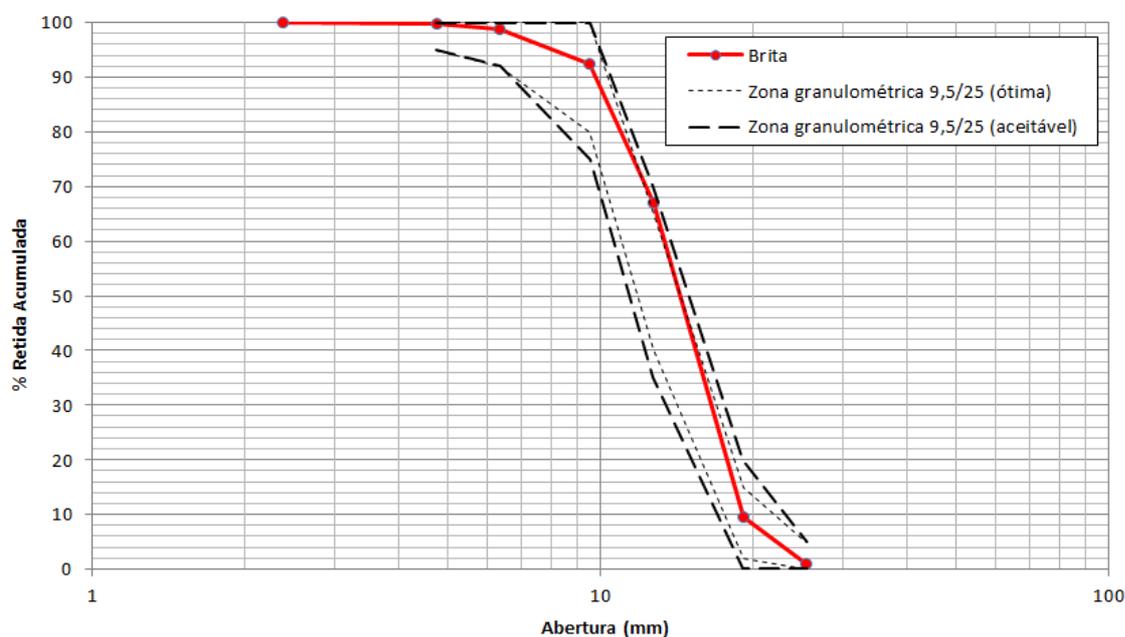


Figura 13 – Curva granulométrica do agregado graúdo.

3.1.4 Água

Para confecção dos concretos utilizados nos ensaios, foi utilizada água da rede de abastecimento da cidade de São Leopoldo. Os valores de resistividade elétrica da água, obtidos a partir de medições com o equipamento desenvolvido, apresentaram uma média de 39,5 Ω .m.

3.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Com o intuito de alcançar os objetivos propostos para este trabalho, foi desenvolvido um programa experimental que possibilitasse a análise da eficiência do método para os cimentos analisados, através das estimativas dos valores da relação água/cimento,

quando comparado aos valores reais utilizados para as misturas. Foram previstos ensaios de compressão axial para elaboração de curvas de correlação com as relações água/cimento utilizadas, permitindo a estimativa dos valores de resistência à compressão a partir das leituras de resistividade elétrica do concreto no estado fresco, para as idades ensaiadas.

O planejamento dos experimentos é descrito inicialmente nesta seção. Em seguida é apresentado o processo de adaptação e montagem do equipamento (sonda) utilizado nos ensaios de resistividade elétrica do concreto. O processo de calibração do equipamento, através da determinação da constante geométrica (k), por meio do método experimental, também é abordado. Na sequência são apresentados os procedimentos de dosagem, moldagem e cura dos concretos. Ao final é feita a descrição dos procedimentos de ensaio adotados, na determinação da resistividade elétrica das misturas de concreto no estado fresco e da resistência à compressão axial no estado endurecido.

3.2.1 Planejamento dos experimentos

De acordo com o objetivo deste trabalho, que é avaliar a capacidade do método da resistividade elétrica em estimar valores de relação água/cimento para os traços de concreto analisados, para os diferentes cimentos utilizados, foram definidos os fatores a serem utilizadas nesta pesquisa. Os fatores de controle, manipulados e definidos com a finalidade de observar sua influência nas variáveis dependentes, estão apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Fatores de controle da pesquisa.

Variáveis independentes	Níveis de estudo
Tipo de cimento Portland	CPV-ARI CPIV-32 CPIII-40 CPII-Z-32 CPII-F-32 CPII-E-40
Relação água/cimento	0,35 0,45 0,55 0,65
Período de cura	3 dias 7 dias 14 dias 28 dias
Tempos de leitura da resistividade elétrica	Medições a cada 10 minutos, durante 2 horas após a mistura

As relações água/cimento utilizadas foram escolhidas por compreenderem o intervalo definido pela NBR 6118 (ABNT, 2014), com relação às classes de agressividade de exposição do concreto, acrescentando-se a relação a/c de 0,35. As idades utilizadas têm a finalidade de avaliar a evolução da resistência à compressão do concreto, até a idade de 28 dias.

As variáveis dependentes são aquelas afetadas e explicadas pelos fatores de controle, sendo relacionadas a seguir:

- a) resistividade elétrica do concreto
- b) resistência à compressão axial

A primeira variável é obtida através do ensaio de resistividade elétrica, a qual pode ser correlacionada à relação água/cimento e o tipo de cimento utilizado na mistura. Já a segunda variável é obtida através de um ensaio destrutivo, por ser um parâmetro de grande importância na avaliação das suas características mecânicas, determinante na programação de etapas construtivas na construção civil.

Com o objetivo de investigar a relação entre a resistividade elétrica e a relação água/cimento do concreto no estado fresco, foram confeccionadas amostras de concreto com seis cimentos nacionais, para quatro diferentes relações água/cimento, sendo os traços de concreto elaborados a partir do método do IPT/EPUSP.

3.2.2 Adaptação e montagem do equipamento

Para realização do estudo, foi necessária a elaboração de um dispositivo de medição de resistividade elétrica, uma vez que não existem dispositivos semelhantes disponíveis para comercialização no mercado, seja a nível nacional ou internacional, tendo sido confeccionados apenas protótipos isolados para utilização em pesquisas acadêmicas (MANCIO et al., 2010; GASPARI, 2013; FLÔRES, 2014). Este dispositivo deve apresentar determinadas propriedades, como: rigidez, uma vez que são ensaiadas amostras que contém agregado graúdo e com elevada consistência (baixas relações a/c); impermeabilidade, dado que a sonda é inserida no interior da amostra no estado fresco e é constantemente lavada, em função do ensaio; além de dimensões apropriadas, que permitam a medição de valores de resistividade de uma fração representativa da amostra de concreto e que não possibilite distorções nos valores obtidos.

O equipamento foi projetado e construído baseado em um arranjo de Wenner, com quatro eletrodos (MORRISON et al., 2004). Este tipo de arranjo bem-estabelecido é normalmente utilizado em explorações geofísicas. Os eletrodos utilizados foram confeccionados com aço inoxidável, sendo separados por uma distância de 25,4 mm (1”) entre eixos, por um material plástico não-condutor (polipropileno), obtendo-se um dispositivo similar ao utilizado por Mancio et al. (2010), em seus ensaios com concretos dosados segundo a norma ACI 211.1 (1991).

Inicialmente foi utilizado um protótipo onde os eletrodos metálicos (com forma de anéis) foram fixados às peças plásticas (confeccionadas em nylon) através da aplicação de uma resina epóxi, aplicada sobre as superfícies das peças, o que não garantiu a estanqueidade necessária para realização contínua dos ensaios com concreto no estado fresco. Este dispositivo apresentou falhas ao longo de sua utilização, com erros nas medições e demora na obtenção das leituras de queda de potencial, em função da entrada de água para o seu interior. Além disso, este método de montagem não proporcionou a rigidez necessária ao conjunto para realização de ensaios com concretos dosados com menor relação a/c, mais “secos”.

O corpo do equipamento desenvolvido é formado por barras de polipropileno (material plástico, não-condutor), rosqueadas aos eletrodos metálicos. As peças plásticas e metálicas possuem diâmetro externo de 20 mm. As peças plásticas foram usinadas de maneira a formar pequenos tubos, por onde é possível a passagem dos cabos e que os eletrodos sejam rosqueados, permitindo a obtenção de um elemento rígido, menos suscetível a deformações. A Figura 14 apresenta um corte esquemático do dispositivo desenvolvido para realização dos ensaios, com as medidas apresentadas em milímetros.

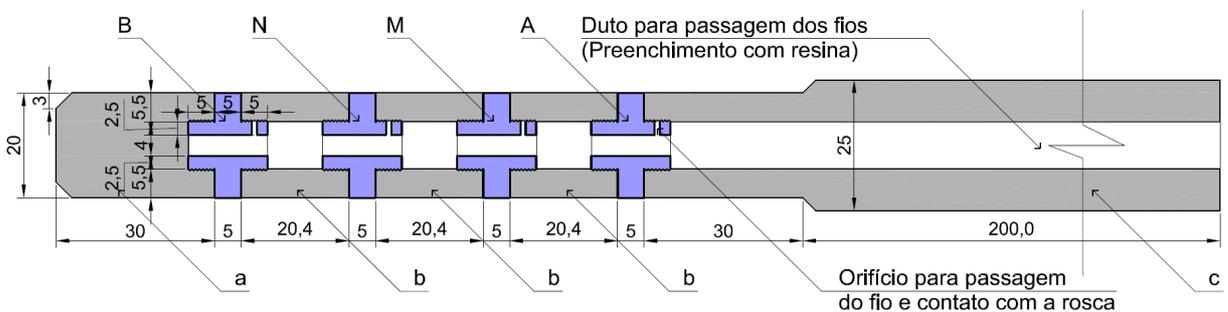


Figura 14 – Corte esquemático do dispositivo.

De acordo com o esquema da Figura 14, os elementos A, B, M e N representam os eletrodos, confeccionados em aço inoxidável, sendo todas as peças idênticas. Já os elementos a, b e c representam as peças confeccionadas em polipropileno, com o objetivo de garantir o

isolamento entre as peças metálicas, além de rigidez e impermeabilidade ao conjunto. A fixação do conjunto foi realizada através do sistema de roscas (macho-fêmea). Um esquema do circuito elétrico da sonda e do experimento de resistividade elétrica é apresentado anteriormente, na Figura 5, no item 2.3.3.

A Figura 15 apresenta um detalhe das peças utilizadas na montagem (a) e da passagem dos fios pelo interior do eletrodo (b), antes da montagem.

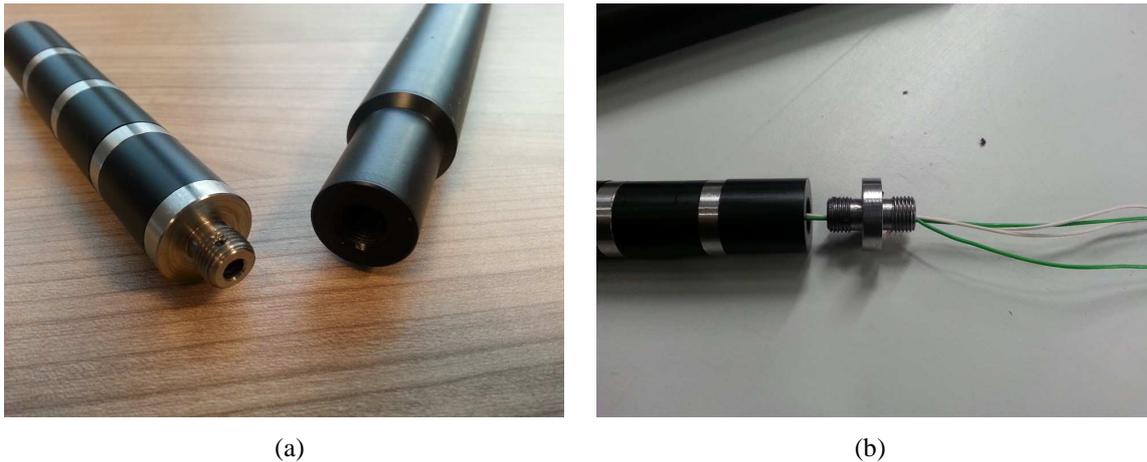


Figura 15 – Detalhes da montagem da sonda: (a) face do eletrodo com rosca e orifício utilizado para passagem dos fios; (b) eletrodo antes de rosqueado ao conjunto do dispositivo.

Os eletrodos foram confeccionados em aço inoxidável, com 20 mm de diâmetro e 5 mm de largura (parede externa), além de roscas posicionadas nas duas faces, com 9 mm de diâmetro por 5 mm de altura, que possibilitaram a fixação dos eletrodos nas peças plásticas. Os eletrodos possuem dois orifícios cada (Figura 15 - a): um posicionado no seu centro, com 4 mm de diâmetro, por onde é feita a passagem dos fios; e outro posicionado em uma das roscas ($\phi \approx 1$ mm), por onde é feita a passagem do fio conectado ao eletrodo e ocorre o contato com a superfície do metal, sendo o fio desencapado posicionado entre a rosca e a peça plástica.

O centro do dispositivo foi totalmente preenchido com uma resina epóxi bicomponente, com o objetivo de selar possíveis infiltrações de água para o seu interior, o que resultaria em falhas nos valores obtidos nos testes de resistividade.

À extremidade do equipamento foi acrescentado um conector, que está ligada aos 4 fios elétricos no interior da sonda e que permite a substituição, quando necessário, do cabo externo. Na parte externa foi utilizado um cabo manga de quatro vias com blindagem, com uma via ligada a cada eletrodo, sendo as paredes do cabo externo “blindadas” quanto a possíveis interferências eletromagnéticas. A Figura 16 apresenta o dispositivo montado.



Figura 16 – Equipamento utilizado na realização dos ensaios de resistividade elétrica.

Para a realização dos ensaios deste estudo foi confeccionada uma única sonda, utilizada tanto para os ensaios de calibração, com as soluções de cloreto de sódio, quanto para os ensaios com todas as amostras de concretos no estado fresco. Ao longo da utilização do equipamento foram realizadas medições de impedância entre os eletrodos, com o objetivo de verificar a possível ocorrência de infiltração e, por consequência, de curto circuito no interior do dispositivo. A verificação é caracterizada pela medição da impedância entre os diferentes eletrodos, sendo que, no caso destes valores serem diferentes de zero, é identificada a passagem de corrente elétrica entre as peças do conjunto, o que é um indicativo da ocorrência de infiltração no seu interior. No entanto, nenhum tipo de problema foi detectado durante a execução de todo o programa experimental.

3.2.3 Calibração do equipamento e determinação do fator geométrico k

O fator geométrico k é uma constante que depende exclusivamente da geometria da sonda utilizada nas medições de resistividade elétrica, devendo ser obtido apenas uma vez, durante o estágio de desenvolvimento do equipamento (MANCIO et al., 2010). A seguir é descrito o método experimental utilizado para obtenção deste fator.

O fator geométrico da sonda é determinado a partir da sua geometria. Para determinação experimental do valor desta constante, a sonda foi submersa em três soluções aquosas preparadas, com baixa, média e alta, resistividades elétricas (ρ_s) conhecidas. A partir da realização de três medições da queda de tensão obtida no resistor

conhecido (V_o e R_o) e nos eletrodos internos da sonda (V), para cada uma das soluções, é possível a aplicação da Equação 14, para determinação do fator k .

$$k = \frac{\rho_s}{R} = \frac{\rho_s \cdot V_o}{R_o \cdot V} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

k = fator geométrico da sonda;

ρ_s = resistividade conhecida da solução aquosa;

R = resistência da solução aquosa;

V = queda de tensão na solução, nos eletrodos internos da sonda;

R_o = resistência do resistor conhecido;

V_o = queda de tensão no resistor.

Para realização do ensaio, foram preparadas três soluções de água com cloreto de sódio (NaCl), com resistividades distintas ($\rho_s \approx 1 \text{ } \Omega\cdot\text{m}$, $5 \text{ } \Omega\cdot\text{m}$, e $10 \text{ } \Omega\cdot\text{m}$), sendo verificada a sua resistividade através da utilização de um condutivímetro. As concentrações de cloreto de sódio adicionadas à solução aquosa, para obtenção das resistividades de 10 , 5 e $1 \text{ } \Omega\cdot\text{m}$, foram próximas de $0,4$, $0,9$ e 5 g/L , respectivamente, sendo que estas concentrações podem variar de acordo com a alcalinidade da água utilizada e da temperatura em que se encontra a solução. Cada solução foi colocada em um recipiente plástico de forma cilíndrica, com dimensões de aproximadamente $\phi 30 \times 40 \text{ cm}$ (em recipientes muito pequenos pode haver interferência das paredes do recipiente no resultado do ensaio), o mesmo tipo de recipiente que foi utilizado para realização dos ensaios com o concreto no estado fresco para as medições de resistividade. Foram então realizadas as medições das quedas de tensão através da inserção da sonda no centro das soluções aquosas (Figura 17), possibilitando a determinação do fator k através da utilização da Equação 14. O fator k da sonda é a média dos valores obtidos para as leituras com as três soluções analisadas.



Figura 17 – Realização do ensaio de calibração da sonda com soluções de resistividades conhecidas.

A Figura 17 mostra a realização do ensaio de calibração da sonda, através da imersão do equipamento no interior das soluções aquosas de resistividades conhecidas. As medições realizadas fora do centro da amostra e próximas às paredes do cilindro são influenciadas pela diferença de condutividade elétrica entre a amostra e o recipiente plástico, devendo então ser evitadas.

As soluções de cloreto de sódio foram dosadas adicionando-se o sal à água da rede de abastecimento da cidade de São Leopoldo, a uma temperatura de $21 \pm 2^\circ\text{C}$. As resistividades utilizadas foram de 1,00, 4,81 e 9,85 $\Omega\cdot\text{m}$, sendo a conferência realizada com a utilização de um medidor portátil de condutividade digital (RS232 *Conductivity Meter* Mod. 8306, marca AKSO), submerso nas soluções (Figura 18).



Figura 18 – Condutivímetro utilizado na calibração das soluções.

3.2.4 Dosagem dos concretos

Utilizou-se o método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1993) para a dosagem dos concretos. Um dos parâmetros de dosagem fixados, para determinação do teor de argamassa e da quantidade de água do traço inicial, foi a manutenção de um abatimento de 100 ± 10 mm (*slump test*), determinado de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998). As etapas do método de dosagem dos concretos empregado neste trabalho estão apresentadas a seguir:

- a) fixação da relação $1:m$ (cimento : agregados secos totais);
- b) determinação experimental do teor de argamassa (α) ideal com os materiais utilizados;
- c) determinação da quantidade de água necessária para a obtenção do abatimento de tronco de cone estipulado;
- d) obtenção da relação água/materiais secos (H);
- e) determinação dos demais traços, variando-se a relação a/c para um H fixo obtido, através da “Lei de Lyse”.

Foi inicialmente estabelecida uma relação para o traço $1:m$ (cimento : agregados secos totais, em massa) igual a $1:5$. O teor de argamassa ideal foi determinado experimentalmente, seguindo-se os procedimentos recomendados por Helene e Terzian (1993). A partir do traço piloto foi determinado, através de tentativas e observações práticas, o teor de argamassa que proporcionou a mistura mais homogênea. O teor de argamassa encontrado foi de 54%, sendo este valor fixado para os traços dos demais cimentos utilizados.

A partir do teor de argamassa estabelecido foram realizados ensaios com todos os cimentos, para determinação da quantidade de água necessária para obtenção de um concreto com um abatimento de tronco de cone de 100 ± 10 mm, sendo os traços mantidos constantes para todos os cimentos neste teste (relação cimento : agregados secos totais = $1:5$).

Na Tabela 13 são apresentados os valores de relação água/cimento e de $H(\%)$, obtidos para todos os cimentos.

Tabela 13 – Determinação da relação água/materiais secos para os cimentos.

Cimento	Abatimento (mm)	Relação a/c	H (%)
CPV-ARI	105	0,564	9,407
CPIV-32	100	0,550	9,168
CPIII-40	105	0,559	9,311
CPII-Z-32	105	0,538	8,973
CPII-F-32	95	0,551	9,183
CPII-E-40	100	0,558	9,302

A partir dos valores de H , conhecidos para cada tipo de cimento, e das relações água/cimento definidas como variáveis independentes neste trabalho ($a/c = 0,35, 0,45, 0,55$ e $0,65$), foi possível a definição dos traços de concreto analisados, apresentados na Tabela 14. Os componentes dos traços são apresentados na ordem de “cimento : agregado miúdo I : agregado miúdo II : agregado graúdo”, em massa.

Tabela 14 – Traços unitários dos concretos utilizados na pesquisa.

Cimento	Relação a/c			
	0,35	0,45	0,55	0,65
CPV-ARI	1 : 0,404 : 0,605 : 1,711	1 : 0,633 : 0,950 : 2,200	1 : 0,863 : 1,294 : 2,698	1 : 1,093 : 1,639 : 3,178
CPIV-32	1 : 0,425 : 0,637 : 1,756	1 : 0,660 : 0,990 : 2,258	1 : 0,896 : 1,344 : 2,760	1 : 1,131 : 1,697 : 3,261
CPIII-40	1 : 0,412 : 0,618 : 1,729	1 : 0,644 : 0,966 : 2,223	1 : 0,876 : 1,314 : 2,717	1 : 1,108 : 1,662 : 3,211
CPII-Z-32	1 : 0,442 : 0,664 : 1,794	1 : 0,683 : 1,025 : 2,307	1 : 0,924 : 1,386 : 2,819	1 : 1,165 : 1,747 : 3,332
CPII-F-32	1 : 0,423 : 0,635 : 1,753	1 : 0,659 : 0,988 : 2,254	1 : 0,894 : 1,341 : 2,755	1 : 1,129 : 1,693 : 3,256
CPII-E-40	1 : 0,413 : 0,619 : 1,731	1 : 0,645 : 0,967 : 2,225	1 : 0,877 : 1,316 : 2,720	1 : 1,109 : 1,664 : 3,214

* cimento : ag. miúdo I : ag. miúdo II : ag graúdo

Na Tabela 15 são apresentados os valores de consumo de cimento obtidos para os traços analisados.

Tabela 15 – Consumo de cimento (kg/m^3) dos traços analisados.

Cimento	Consumo de cimento (kg/m^3)			
	0,35	0,45	0,55	0,65
CPV-ARI	587	459	370	316
CPIV-32	565	430	357	304
CPIII-40	579	441	364	312
CPII-Z-32	555	432	354	299
CPII-F-32	574	438	357	309
CPII-E-40	580	444	364	312

A determinação da consistência dos concretos foi realizada através do ensaio de abatimento de tronco de cone, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR NM 67 (ABNT, 1998).

3.2.5 Confeção das amostras

Para os ensaios de resistividade elétrica no estado fresco, foram utilizados moldes cilíndricos (ϕ 28 x 40 cm) de material plástico, com objetivo de evitar que o material do recipiente interferisse na condutividade da amostra. Foram utilizados moldes com estas dimensões pois, em recipientes muito pequenos, pode haver interferência das paredes do recipiente no resultado do ensaio.

Uma fração do concreto foi utilizada para confecção de corpos de prova cilíndricos de concreto (ϕ 10 x 20 cm), para realização de ensaios de compressão axial. As idades ensaiadas, apresentadas no item 3.2.1, foram definidas com o objetivo de verificar a evolução da resistência à compressão do concreto nas suas idades iniciais. Foram moldadas três amostras de concreto para serem ensaiadas em cada uma das idades estipuladas.

Foi realizada uma moldagem para cada tipo de cimento *versus* relação água/cimento utilizados, sendo que: para os cimentos CPV-ARI, CPIV-32, CPII-Z-32 e CPII-F-32, foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos em cada betonada; para o cimento CPII-E-40, foram moldados 9 corpos de prova cilíndricos por betonada; e, para o cimento CPIII-40, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos em cada betonada. O número de corpos de prova foi limitado em função das quantidades de cimento obtidas, uma vez que as quantidades de CPII-E-40 e CPIII-40 foram inferiores às demais. Foram ensaiadas 3 amostras por idade de ruptura, nos ensaios de compressão axial, com o objetivo de obter-se uma curva representativa da evolução da resistência à compressão dos concretos ensaiado. As moldagens dos corpos de prova de concreto foram realizadas de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015).

Para os ensaios de resistividade elétrica no estado fresco, foram coletadas duas amostras para cada moldagem, de acordo com o descrito no item 3.2.7.

O processo de mistura dos materiais foi realizado em uma betoneira de eixo vertical com capacidade aproximada de mistura de 70 litros (não nominal), num tempo total de 4 minutos e 30 segundos. A sequência de colocação dos materiais, realizada com a betoneira em movimento, foi mantida a mesma para todas as moldagens com concreto:

- a) 100% da brita + 33% da água;
- b) 100% do cimento + 33% da água;
- c) 100% das areias (previamente misturadas) + 34% da água.

Os tempos de mistura foram mantidos os mesmos para todas moldagens, sendo mostrados na sequência:

- a) brita + água → 30 segundos;
- b) + cimento + água → + 1:30 minuto;
- c) + areias → + 2 minutos e 30 segundos.

3.2.6 Cura

Concluída a colocação do material dentro dos moldes, os mesmos foram cobertos com placas de vidro. Passadas 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e levados a um ambiente controlado (câmara úmida), com temperaturas no intervalo de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e com umidade relativa do ar superior a 95%. Os corpos de prova permaneceram neste ambiente de cura até as idades de ensaio (3, 7, 14 e 28 dias), quando retirados para realização dos testes de resistência à compressão.

As demais amostras de concreto, utilizadas para os ensaios de resistividade elétrica, após a concretagem, foram imediatamente colocadas dentro do recipiente de ensaio e levadas à sala climatizada, com temperaturas no intervalo de $21 \pm 2^\circ\text{C}$ e com umidade relativa próxima de 70%, permanecendo neste ambiente durante a realização das medições. As amostras foram sempre homogeneizadas antes da realização das medições, não havendo nenhuma forma de proteção dos recipientes contra a evaporação. Após este período as amostras foram descartadas.

3.2.7 Ensaios de resistividade elétrica do concreto no estado fresco

Logo após a realização das misturas as amostras de concreto foram inseridas nos recipientes plásticos e trazidas para o ambiente de realização dos ensaios. As medições de resistividade elétrica foram iniciadas cerca de 15 minutos após a etapa de adição do cimento à mistura. Durante o ensaio, a sonda é submergida no centro da amostra de concreto no estado fresco, fazendo com que a corrente flua através do material, o que permite a realização das leituras.

Para a realização dos ensaios em laboratório foi utilizada uma fonte de alimentação externa (MINIPA – *Function Generator* MFG-4201A), fornecendo uma corrente alternada (AC) com amplitude de 1,5 V, frequência de 1 kHz e ondas de forma senoidal. À fonte de alimentação foi conectado um resistor com resistência conhecida ($R_o = 148,62 \Omega$), ligado em série com a sonda, sendo um multímetro conectado em paralelo com o resistor. Os

dois eletrodos externos da sonda (*A* e *B* – ver Figura 5, no item 2.3.3) são conectados ao circuito, enquanto que os dois eletrodos internos (*M* e *N* – Figura 5) são ligados em paralelo a um multímetro. Os multímetros portáteis utilizados (ICEL – MD-90) no sistema apresentam as quedas de potenciais obtidas no resistor, R_o , e nos eletrodos internos da sonda, *M* e *N*. A Figura 19 apresenta o sistema de bancada utilizado, conectado à sonda.



Figura 19 – Equipamentos utilizados na realização dos ensaios de resistividade elétrica.

Na Figura 19 são apresentados os componentes do sistema de bancada, utilizado para realização dos ensaios de resistividade elétrica: (A) gerador de funções; (B) resistor conectado em série; (C) multímetro conectado ao resistor, que apresenta a queda de potencial em R_o (V_o); (D) multímetro conectado em paralelo aos eletrodos internos da sonda (V_c); (E) sonda de resistividade elétrica, com dois eletrodos externos conectados ao circuito. O esquema elétrico do ensaio pode ser observado na Figura 5.

Após a mistura, o concreto foi colocado em recipientes plásticos cilíndricos, para realização das medições de resistividade elétrica, em duas amostras independentes ao longo do tempo (Figura 20). Em todos os ensaios a sonda é submergida verticalmente na mistura, no centro do cilindro plástico, sendo completamente envolvida pelo material (região dos eletrodos). Foram realizadas 3 medições da resistividade elétrica do material a cada 10 minutos, num intervalo de aproximadamente 2 horas após a mistura, para as relações *a/c* de 0,45, 0,55 e 0,65, utilizando duas amostras independentes para cada ensaio, sendo a sonda removida e reinserida na amostra para realização de cada medição individual. Para a relação *a/c* mais baixa (de 0,35), em função das dificuldades de mistura e de inserção da sonda no

interior das amostras de concreto, ocasionadas pela perda de trabalhabilidade das misturas, foram realizadas medições para um intervalo de apenas 60 minutos após a mistura, para todos os cimentos utilizados.



Figura 20 – Recipiente utilizado para realização dos ensaios de resistividade elétrica.

A partir da reformulação da Equação 14 (ver item 2.3.3), foi obtida a Equação 15, que permite a obtenção da resistividade elétrica das misturas analisadas.

$$\rho_c = k \cdot R_c = k \cdot \frac{R_o \cdot V_c}{V_o} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

ρ_c = resistividade elétrica do concreto fresco;

R_c = resistência elétrica do concreto fresco;

V_c = queda de tensão no concreto, nos eletrodos internos da sonda;

V_o = queda de tensão no resistor, conectado em série ao circuito.

Os resultados apresentados são médias aritméticas de três leituras de resistividade elétrica para cada idade, tendo sido realizadas com duas amostras independentes para cada traço, com o objetivo de verificar a variação do ensaio entre as amostras do mesmo concreto. Os resultados das medições individuais são apresentados nos Apêndices.

Antes da realização de cada uma das medições, o material no interior do recipiente plástico foi completamente remisturado, simulando as condições de recebimento do concreto no canteiro de obras. Para realização da mistura foi utilizada uma colher de pedreiro (com comprimento de 12 cm e 8 cm de largura na parte mais larga), sendo a mistura e o adensamento realizados durante cerca de 30 segundos antes da realização da medição, com o objetivo de evitar a ocorrência de exsudação e de segregação nas amostras de concreto fresco.

Foi verificada também a resistividade elétrica da água de amassamento, utilizada na confecção dos concretos, com o objetivo de manter este parâmetro como uma variável controlada durante todos os ensaios.

Para realização das estimativas de relação água/cimento, foram inseridos os resultados das medições de resistividade elétrica nas equações de correlação entre a relação a/c e a resistividade elétrica, elaboradas para cada um dos cimentos analisados.

Já os valores de resistência à compressão estimados a partir do método foram obtidos através da inserção das estimativas de relação a/c nos gráficos de correlação entre a relação a/c e a resistência à compressão, para as idades ensaiadas. O erro efetivo entre os valores obtidos experimentalmente nos ensaios de resistência à compressão e os obtidos através das curvas de correlação pode ser calculado através da Equação 16, apresentada a seguir:

$$E(f_c) = \sqrt{\left(\frac{f_c - f_{c,est}}{f_c}\right)^2} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

$E(f_c)$ = erro efetivo;

f_c = valor obtido experimentalmente no ensaio de resistência à compressão axial;

$f_{c,est}$ = valor de resistência estimado a partir do método (item 4.4).

3.2.8 Ensaios de resistência à compressão axial

Os ensaios de compressão axial foram realizados de acordo com as Normas Brasileiras NBR 7215 (ABNT, 1997) e NBR 5739 (ABNT, 2007). A prensa utilizada nos ensaios de compressão dos cilindros de ϕ 100 x 200 mm foi uma CONTROLS, com carregamentos de compressão, acionamento hidráulico e 2000 kN de capacidade de carga. A

taxa de acréscimo de tensão utilizada foi de 0,45 MPa/s, conforme a Norma NBR 5739 (ABNT, 2007), para todas as amostras de concreto ensaiadas.

Para evitar os problemas causados pelas superfícies irregulares e não planas, antes da realização dos ensaios de ruptura, foi realizada a regularização dos corpos de prova através retificação das suas bases, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). Este processo garante uma distribuição uniforme das forças de compressão, através de superfícies opostas planas e paralelas entre si. Após, foram realizadas as medições dos corpos de prova preparados, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), com o objetivo de verificar a relação altura diâmetro (h/d) das amostras e realizar as correções necessárias.

As idades de ensaio das amostras de concreto foram de 3, 7, 14 e 28 dias, conforme descrito no item 3.2.1.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos pelos ensaios realizados durante o programa experimental, descrito no capítulo 3.

4.1 ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Na Tabela 16 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de calibração do equipamento com as soluções de cloreto de sódio, para verificação experimental do fator geométrico do equipamento.

Tabela 16 – Ensaio de calibração do equipamento.

ρ_s ($\Omega.m$)	k_1	k_2	k_3	ρ_{s1} ($\Omega.m$)	ρ_{s2} ($\Omega.m$)	ρ_{s2} ($\Omega.m$)
1,00	0,3660	0,3604	0,3604	1,00	1,02	1,02
4,81	0,3607	0,3635	0,3614	4,89	4,85	4,88
9,95	0,3764	0,3764	0,3761	9,70	9,70	9,70
Fator geométrico k médio =					0,3668	
Desv. Padrão (%) =					14,93	

Foram dosadas três soluções com cloreto de sódio para realização do ensaio de determinação do fator geométrico k , sendo o seu valor baseado na média de 9 leituras. O valor médio encontrado para o fator k foi de 0,3668, resultando em um desvio de 14,93%, quando comparado ao valor teórico previamente calculado de 0,319 (apresentado em 2.3.3.1). Esta diferença pode ser atribuída a imprecisões nas medições de resistividade, assim como ao fato de que foram assumidos pontos infinitesimalmente pequenos (ou seja, sem volume, área ou comprimento) como fonte de corrente no cálculo teórico, ao invés dos elementos com dimensões conhecidas. Fica evidente a necessidade de se realizar a calibração do equipamento com o uso das soluções, vista a grande diferença com relação ao valor teórico.

Cabe ressaltar que o fator geométrico da sonda é uma constante dependente apenas da geometria do equipamento, não necessitando de calibrações periódicas. A sua calibração é necessária apenas uma vez, na fase de ajuste do equipamento.

4.2 ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

A seguir são apresentados resultados dos ensaios de resistividade elétrica do concreto no estado fresco, obtidos para os cimentos estudados. As tabelas com os valores das leituras de queda de voltagem nos multímetros, assim como os valores individuais de resistividade ao longo do tempo, estão apresentados nos Apêndices. Inicialmente são

apresentadas breves considerações dos resultados obtidos, sendo realizada uma análise detalhada, através da comparação geral dos resultados de resistividade elétrica, no item 4.2.7.

4.2.1 CPV-ARI

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica do concreto no estado fresco, obtidos pelas amostras confeccionadas com CPV-ARI, para as relações a/c de 0,35, 0,45, 0,55 e 0,65, estão inseridos na Tabela 17. Os resultados de resistividade elétrica são valores médios de três leituras para cada idade (entre 0 e 120 minutos após a realização da mistura), tendo o ensaio sido realizado com duas amostras para cada traço, originadas de uma mesma mistura. Os valores de resistividade elétrica foram obtidos através das leituras de queda de tensão nos multímetros, como descrito no item 3.2.7, sendo inseridas na Equação 14.

Tabela 17 – Resistividade elétrica do concreto fresco com CPV-ARI, em função do tempo, para diferentes relações a/c.

Resistividade elétrica ($\Omega.m$) para as diferentes relações a/c (CPV-ARI)								
Relação a/c	0,35		0,45		0,55		0,65	
Tempo (min)	Amostra 1	Amostra 2						
0	2,29	2,24	2,79	2,87	3,10	3,08	3,63	3,59
10	2,24	2,26	2,68	2,72	3,08	3,14	3,52	3,55
20	2,11	2,22	2,79	2,69	3,15	3,14	3,45	3,56
30	2,16	2,28	2,66	2,77	3,17	3,05	3,56	3,59
40	2,16	2,15	2,75	2,80	3,27	3,16	3,51	3,53
50	2,35	2,28	2,76	2,77	3,17	3,11	3,56	3,52
60	2,25	2,33	2,76	2,82	3,15	3,19	3,60	3,63
70	-	-	2,85	2,83	3,23	3,16	3,51	3,65
80	-	-	2,75	2,87	3,28	3,21	3,65	3,57
90	-	-	2,83	2,82	3,28	3,20	3,70	3,73
100	-	-	2,83	3,01	3,37	3,26	3,65	3,67
110	-	-	2,83	2,92	3,40	3,26	3,81	3,65
120	-	-	2,96	3,06	3,47	3,41	3,57	3,86
ρ_{med} ($\Omega.m$)	2,24		2,81		3,21		3,61	

A Figura 21 ilustra o comportamento da resistividade elétrica ao longo das idades iniciais do concreto no estado fresco, confeccionado com o cimento CPV-ARI, a partir dos resultados apresentados na Tabela 17.

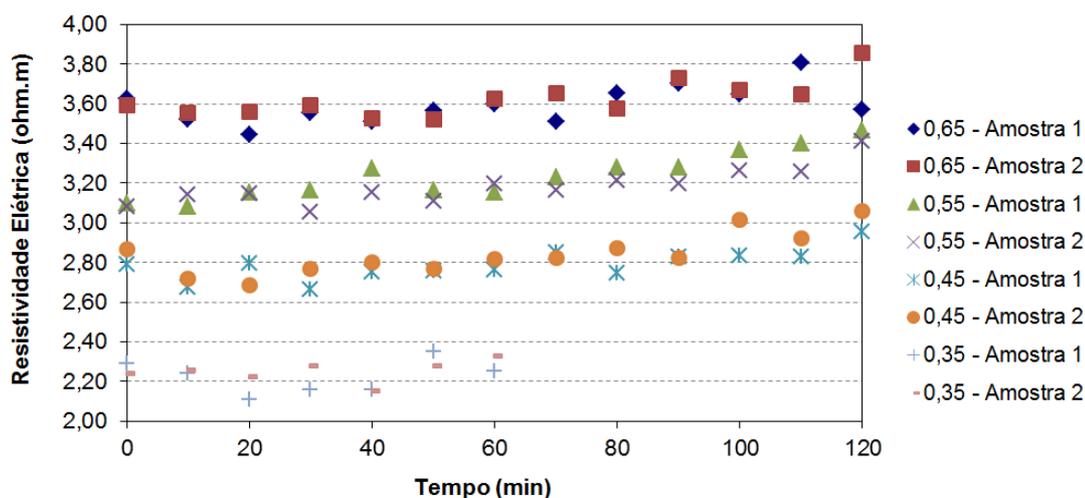


Figura 21 – Variação da resistividade elétrica no tempo (CPV).

Pode-se observar, a partir da Figura 21 e dos resultados da Tabela 17, que os valores de resistividade elétrica aumentaram à medida que foram aumentados os valores de relação a/c da mistura, assim como já era esperado. Além disso, é possível perceber que as amostras independentes, utilizadas para realização das medições, apresentaram comportamentos bastante similares, para uma mesma mistura. Com relação à influência do tempo nos valores de resistividade elétrica do concreto no estado fresco, pode-se perceber que ocorreram pequenas variações ao longo do intervalo de ensaio, sendo apresentada a análise estatística detalhada, com a utilização de Análise de Variância (ANOVA) dos dados obtidos para todos os cimentos no capítulo 4.2.8. Na sequência são apresentados os valores médios e a análise dos resultados obtidos.

A Tabela 18 apresenta os valores médios de resistividade elétrica, medidos em função da relação água/cimento da mistura, para o cimento CPV-ARI.

Tabela 18 – Relação a/c e a resistividade elétrica do concreto fresco (CPV-ARI).

Relação a/c efetiva	ρ_{med} ($\Omega.m$)	Desv. Padrão ($\Omega.m$)	C.V. (%)
0,35	2,24	0,077	3,45
0,45	2,81	0,113	4,00
0,55	3,21	0,125	3,89
0,65	3,61	0,121	3,35

Considerando os resultados obtidos na Tabela 18, é possível perceber que o aumento na relação a/c de 0,35 para 0,45 gerou um crescimento no valor médio de resistividade elétrica na ordem de 25,5%; já a variação para 0,55 resultou num acréscimo na

ordem de 43,3%; enquanto que, para a relação a/c de 0,65, o acréscimo foi na ordem de 61,2%, com relação à menor relação a/c.

A Figura 22 apresenta a relação obtida entre a relação água/cimento e a resistividade elétrica do concreto no estado fresco, confeccionado com o cimento CPV-ARI, a partir dos resultados apresentados na Tabela 18.

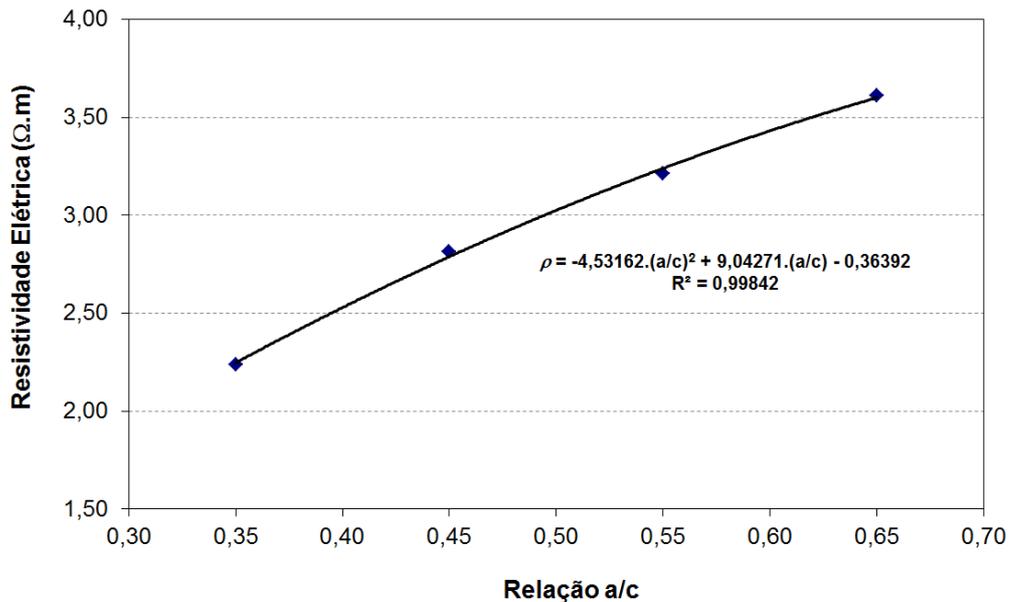


Figura 22 – Relação entre resistividade elétrica e relação a/c do concreto fresco (CPV-ARI).

Através da observação das Figuras 21 e 22, é possível perceber uma forte relação existente entre a resistividade elétrica do concreto no estado fresco e as relações água/cimento ensaiadas. O comportamento da curva de correlação é similar ao obtido por Mancio et al. (2010). A análise e a discussão dos resultados são apresentadas no item 4.2.7, uma vez que os cimentos apresentaram comportamentos similares.

A curva de correlação, elaborada de acordo com a Figura 22, foi utilizada para estimativa dos valores de relação água/cimento, a partir das medições de resistividade do concreto, no estado fresco. A solução da equação quadrática, utilizada para determinação dos valores de relação a/c, é descrita através da Equação 17.

$$a/c = \frac{-9,0427 + \sqrt{-18,1265 \cdot \rho + 75,1740}}{-9,0632} \quad \text{Equação 17}$$

A partir da inserção dos valores de resistividade elétrica (ρ) obtidos experimentalmente (Tabela 17) na Equação 17, foi possível obter as estimativas dos valores de relação a/c. As estimativas obtidas foram baseadas na média de três medidas de

resistividade elétrica em cada idade, sendo o resultado apresentado na Tabela 19 composto pela média destas estimativas, para duas amostras independentes. Os intervalos de variação foram obtidos a partir de uma curva de distribuição normal, com cerca de 95% de confiança, através das médias obtidas e variando-se os valores em duas vezes o desvio padrão calculado, para mais e para menos. Os erros se referem às estimativas de relação a/c baseadas na média de três medidas de resistividade em cada idade, realizadas durante o período de ensaio, tendo sido calculados a partir da Equação 16, com relação aos valores efetivos. Cabe ressaltar que a equação de correlação é válida apenas para o cimento em questão e para valores compreendidos entre as relações água/cimento analisadas, não podendo ser extrapolada para valores fora deste intervalo.

Tabela 19 – Comparação entre a relação a/c efetiva e a estimada a partir do método (CPV-ARI).

Relação a/c efetiva	Relação a/c estimada	Desvio Padrão	C. V. (%)	Intervalo de variação (95% confiança)	Erro médio (%)	Erro max. (%)	Erro min. (%)
0,35	0,35	0,012	3,41	0,35 ± 0,02	2,62	6,47	0,27
0,45	0,46	0,020	4,33	0,46 ± 0,04	4,18	16,44	0,16
0,55	0,54	0,027	4,94	0,54 ± 0,05	6,47	17,23	0,49
0,65	0,65	0,031	4,81	0,65 ± 0,06	6,57	26,84	0,12

Os valores estimados a partir do método foram bastante próximos aos valores efetivos, para todas as misturas analisadas. As estimativas realizadas apresentaram erros efetivos médios entre 2,62% e 6,57%. Os baixos valores obtidos para o desvio padrão e coeficiente de variação corroboram com a precisão das estimativas realizadas. Por exemplo, para uma medição que indique um valor de relação a/c de 0,35, é possível afirmar, com 95% de certeza, que a relação a/c efetiva encontra-se no intervalo de 0,33 a 0,37, o que implica em estimativas de resistência à compressão num intervalo de ± 2 MPa, aos 28 dias. Os resultados relacionados às estimativas de resistência à compressão, obtidas a partir das estimativas de relação a/c, são apresentados no item 4.4.

4.2.2 CPIV-32

Na Tabela 20 são apresentados os resultados dos ensaios de resistividade elétrica do concreto no estado fresco, obtidos pelas amostras confeccionadas com CPIV-32.

Tabela 20 – Resistividade elétrica do concreto fresco com CPIV-32, em função do tempo, para diferentes relações a/c.

Resistividade elétrica ($\Omega.m$) para as diferentes misturas (CPIV-32)								
Relação a/c	0,35		0,45		0,55		0,65	
Tempo (min)	Amostra 1	Amostra 2						
0	2,80	2,94	3,61	3,46	3,79	3,94	4,38	4,54
10	2,77	2,88	3,42	3,45	3,85	4,00	4,58	4,73
20	2,79	2,89	3,48	3,60	3,83	3,94	4,72	4,62
30	2,78	2,98	3,46	3,60	3,94	4,00	4,69	4,81
40	2,86	2,96	3,48	3,65	3,99	4,09	4,78	4,82
50	2,80	2,95	3,46	3,63	4,09	4,03	4,92	4,93
60	2,86	2,92	3,44	3,74	4,14	4,06	4,94	4,95
70	-	-	3,53	3,70	4,14	4,05	5,01	4,88
80	-	-	3,47	3,58	4,14	4,01	4,91	5,12
90	-	-	3,52	3,69	4,03	4,06	5,04	4,91
100	-	-	3,58	3,79	4,17	4,21	5,06	5,06
110	-	-	3,57	3,75	4,23	4,22	5,12	4,98
120	-	-	3,64	3,59	4,32	4,19	5,01	5,11
ρ_{med} ($\Omega.m$)	2,87		3,57		4,06		4,87	

A Figura 23 ilustra o comportamento da resistividade elétrica ao longo das idades iniciais, para o concreto no estado fresco, confeccionado com o cimento CPIV-32, a partir dos resultados apresentados na Tabela 20.

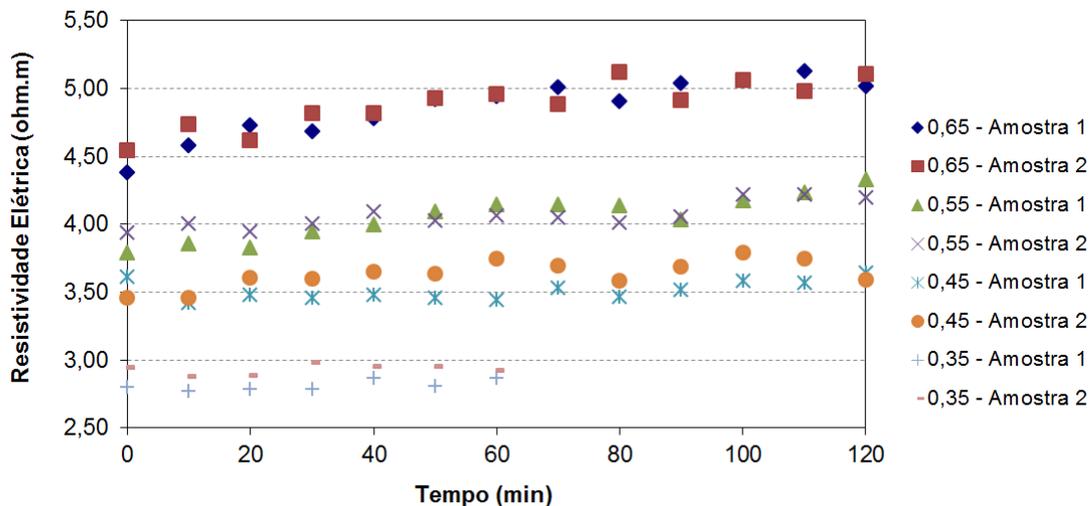


Figura 23 – Variação da resistividade elétrica no tempo (CPIV-32).

Da mesma forma que para o cimento CPV-ARI, a partir da Figura 23 é possível perceber que os valores de resistividade elétrica foram superiores à medida que foram aumentados os valores de relação a/c da mistura, assim como esperado. É possível também

perceber que as amostras independentes, utilizadas para realização das medições, apresentaram comportamentos similares, para uma mesma mistura.

A Tabela 21 apresenta os valores médios de resistividade elétrica, medidos em função da relação água/cimento da mistura, para o cimento CPIV-32.

Tabela 21 – Relação a/c e a resistividade elétrica do concreto fresco (CPIV-32).

Relação a/c efetiva	ρ_{med} ($\Omega.m$)	Desv. Padrão ($\Omega.m$)	C.V. (%)
0,35	2,87	0,085	2,95
0,45	3,57	0,128	3,58
0,55	4,06	0,152	3,75
0,65	4,87	0,213	4,37

Considerando-se os resultados médios apresentados na Tabela 21, é possível perceber que o aumento na relação a/c de 0,35 para 0,45 gerou um crescimento no valor médio de resistividade elétrica na ordem de 24,4%; já a variação para 0,55 resultou num acréscimo na ordem de 41,5%; enquanto que, para a relação a/c de 0,65, o acréscimo foi na ordem de 69,7%, com relação à menor relação a/c.

A Figura 24 apresenta a relação entre a relação água/cimento e a resistividade elétrica do concreto no estado fresco, confeccionado com o cimento CPIV-32, a partir dos resultados apresentados na Tabela 21.

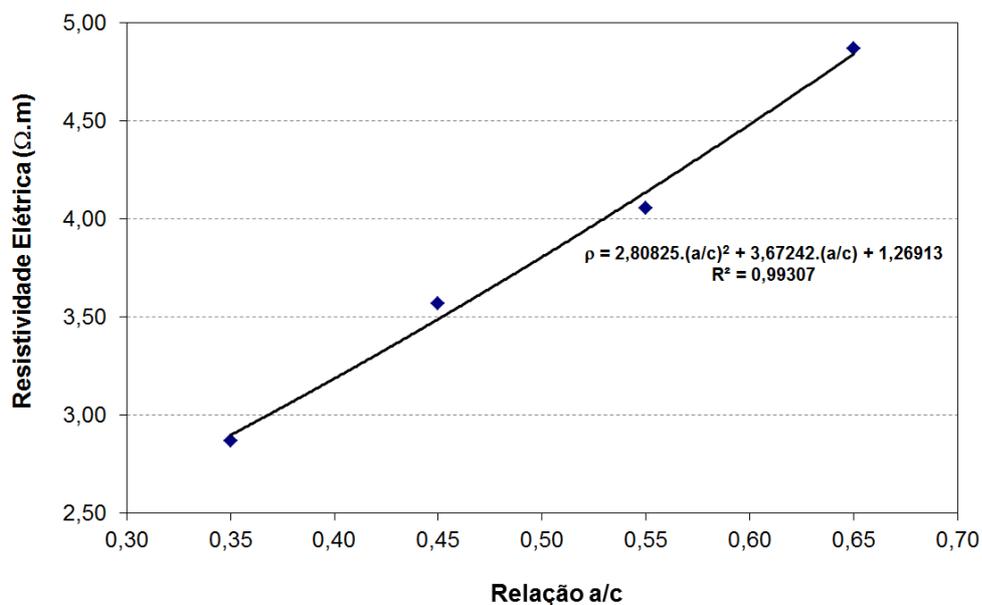


Figura 24 – Relação entre resistividade elétrica e relação a/c do concreto fresco (CPIV-32).

A partir da análise das Figuras 23 e 24, é possível perceber a correlação existente entre a resistividade elétrica do concreto no estado fresco e a relação água/cimento utilizada, sendo maiores os valores de resistividade elétrica para maiores valores de relação a/c.

Através da comparação das Figuras 22 e 24, que correlacionam a relação água/cimento e a resistividade elétrica do concreto fresco, para os cimentos CPV-ARI e CPIV-32, respectivamente, pode-se perceber que, para o cimento CPV-ARI, foi obtida uma curva de ajuste côncava (concavidade para baixo), o que indica que, com o aumento da relação a/c, menores são as variações obtidas nos valores de resistividade elétrica (dentro do intervalo de relações a/c investigado). Já para o cimento CPIV-32 foi verificado o comportamento inverso, uma vez que foi obtida uma curva de ajuste convexa (concavidade para cima), mostrando que aumentos na relação a/c tendem a aumentar a influência sobre a variável resposta (resistividade). Este comportamento destaca a importância do conhecimento do tipo de cimento utilizado para confecção dos concretos, assim como a necessidade da obtenção da curva de correlação entre a relação a/c e a resistividade, antes da realização das medições. Uma mesma tendência de comportamento foi verificado por Gaspari (2013), ao comparar amostras confeccionadas com CPV-ARI e CPIV-32. Apesar dos diferentes traços e das diferentes relações a/c investigadas pelo autor, no caso do CPV-ARI, aumentos na relação a/c acarretaram em menor variação nos resultados de resistividade elétrica, enquanto que, no caso do CPIV-32, aumentos na relação a/c resultaram em maiores variações nos valores de resistividade.

A curva de correlação, obtida a partir da Figura 24, foi utilizada para estimativa dos valores de relação água/cimento, a partir das medições de resistividade do concreto, no estado fresco. A solução da equação quadrática, utilizada para determinação dos valores de relação a/c, é descrita através da Equação 18.

$$a/c = \frac{-3,6724 + \sqrt{11,2330 \cdot \rho - 0,7695}}{5,6165} \quad \text{Equação 18}$$

A partir da inserção dos valores de resistividade elétrica (ρ) obtidos experimentalmente (Tabela 20) na Equação 18, foi possível obter as estimativas dos valores de relação a/c, sendo os resultados apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Comparação entre a relação a/c efetiva e a estimada a partir do método (CPIV-32).

Relação a/c efetiva	Relação a/c estimada	Desvio Padrão	C. V. (%)	Intervalo de variação (95% confiança)	Erro médio (%)	Erro max. (%)	Erro min. (%)
0,35	0,35	0,013	3,78	0,35 ± 0,03	3,32	6,59	0,44
0,45	0,46	0,017	3,65	0,46 ± 0,03	4,78	13,38	0,59
0,55	0,54	0,020	3,65	0,54 ± 0,04	5,22	15,27	0,05
0,65	0,65	0,027	4,08	0,65 ± 0,05	6,35	18,48	1,03

Assim como observado anteriormente para o cimento CPV-ARI, os valores estimados se aproximaram dos valores efetivos, para todas as misturas analisadas. As estimativas realizadas apresentaram erros efetivos médios entre 3,32% e 6,35%. Os valores obtidos para o desvio padrão e o coeficiente de variação corroboram com a precisão das estimativas realizadas.

4.2.3 CPIII-40

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica do concreto no estado fresco, obtidos pelas amostras confeccionadas com CPIII-40, são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Resistividade elétrica do concreto fresco com CPIII-40, em função do tempo, para diferentes relações a/c.

Resistividade elétrica ($\Omega.m$) para as diferentes misturas (CPIII-40)								
Relação a/c	0,35		0,45		0,55		0,65	
Tempo (min)	Amostra 1	Amostra 2						
0	4,99	5,12	6,56	6,33	6,48	6,72	7,24	7,31
10	5,00	5,14	6,42	6,06	6,62	6,50	7,30	6,88
20	4,75	4,86	6,34	6,14	6,78	6,39	7,13	7,10
30	4,67	4,82	6,22	5,97	6,43	6,21	7,18	7,22
40	4,78	4,72	6,17	6,10	6,71	6,17	6,96	7,43
50	4,69	4,61	6,09	6,06	6,52	6,18	6,92	7,31
60	4,53	5,03	6,00	5,94	6,33	6,22	7,14	6,98
70	-	-	5,93	5,76	6,68	6,31	7,01	7,13
80	-	-	5,77	5,82	6,29	6,32	7,07	7,00
90	-	-	5,74	5,62	6,47	6,34	6,67	6,91
100	-	-	5,95	5,84	6,26	6,23	6,61	7,07
110	-	-	5,90	5,81	6,33	6,06	6,80	6,87
120	-	-	5,80	5,74	6,29	6,25	6,74	6,90
ρ_{med} ($\Omega.m$)	4,83		6,00		6,39		7,03	

A Figura 25 ilustra o comportamento da resistividade elétrica ao longo das idades iniciais, para o concreto no estado fresco, a partir dos resultados apresentados na Tabela 23.

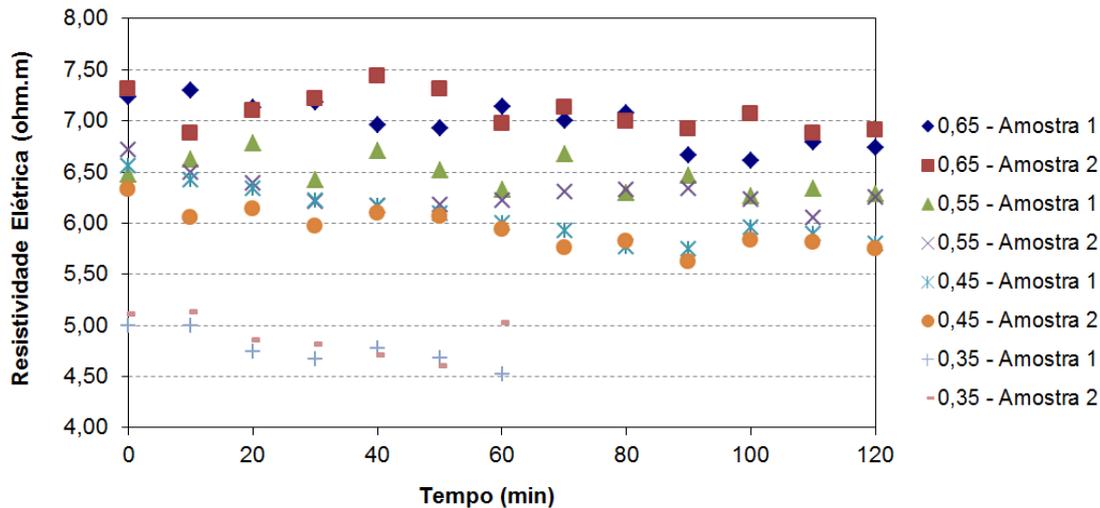


Figura 25 – Variação da resistividade elétrica no tempo (CPHI-40).

A partir da Figura 25 e dos resultados da Tabela 23, é possível perceber que os valores de resistividade elétrica foram superiores à medida que foram aumentados os valores de relação a/c da mistura, da forma esperada. Além disso, é possível perceber que as amostras independentes, utilizadas para realização das medições, apresentaram comportamentos similares, para uma mesma mistura.

A Tabela 24 apresenta os valores médios de resistividade elétrica, medidos em função da relação água/cimento da mistura, para o cimento CPHI-40.

Tabela 24 – Relação a/c e a resistividade elétrica do concreto fresco (CPHI-40).

Relação a/c efetiva	ρ_{med} ($\Omega.m$)	Desv. Padrão ($\Omega.m$)	C.V. (%)
0,35	4,83	0,231	4,77
0,45	6,00	0,266	4,43
0,55	6,39	0,215	3,37
0,65	7,03	0,251	3,58

Tomando-se como referência os resultados médios apresentados na Tabela 24, é possível perceber que o aumento na relação a/c de 0,35 para 0,45 gerou um crescimento no valor médio de resistividade elétrica na ordem de 24,2%; já a variação para 0,55 resultou num acréscimo na ordem de 32,3%; enquanto que, para a relação a/c de 0,65, o acréscimo foi na ordem de 45,6%, com relação à menor relação a/c.

A Figura 26 apresenta a relação entre a resistividade elétrica do concreto no estado fresco e a relação água/cimento, confeccionado com o cimento CPHI-40, a partir dos resultados apresentados na Tabela 24.

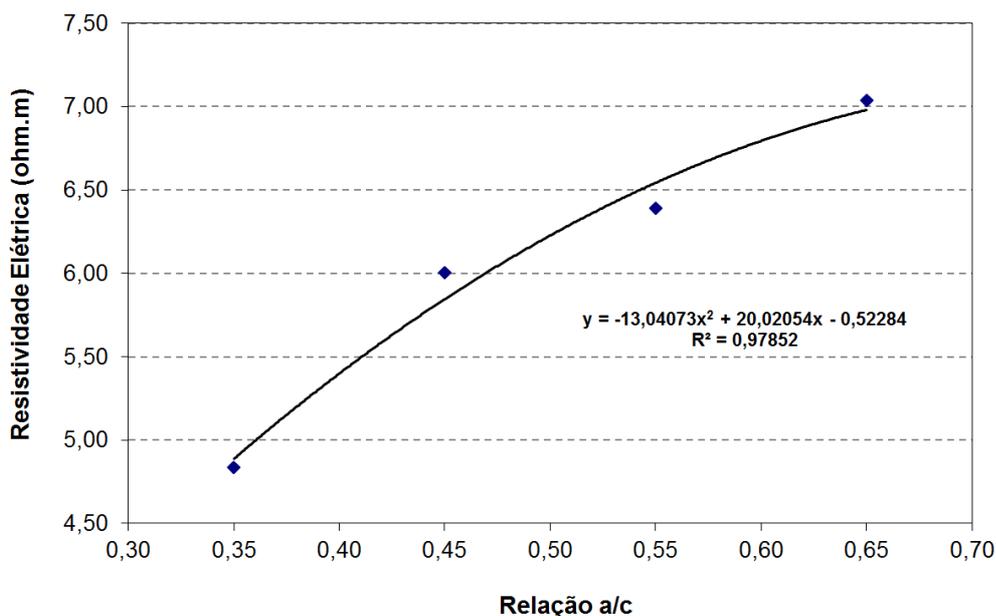


Figura 26 – Relação entre resistividade elétrica e relação a/c do concreto fresco com ajuste polinomial (CPIII-40).

Através da análise das Figuras 25 e 26, é possível perceber a relação existente entre a resistividade elétrica do concreto no estado fresco e a relação água/cimento utilizada. A curva de correlação, obtida a partir da Figura 26, foi utilizada para estimativa dos valores de relação água/cimento, a partir das medições de resistividade do concreto, no estado fresco. A solução da equação quadrática, utilizada para determinação dos valores de relação a/c, é descrita através da Equação 19.

$$a/c = \frac{-20,0205 + \sqrt{-52,1629 \cdot \rho + 373,5492}}{-26,0815} \quad \text{Equação 19}$$

A partir da inserção dos valores de resistividade elétrica (ρ) obtidos experimentalmente (Tabela 23) na Equação 19, foi possível obter as estimativas dos valores de relação a/c, sendo os resultados apresentados na Tabela 25. O modelo da curva de ajuste polinomial utilizada na Figura 26, em específico para o cimento CPIII-40, não abrange todos os valores individuais obtidos nas leituras de resistividade para a relação a/c igual a 0,65, uma vez que o ponto de inflexão da curva possui coordenada “y” inferior a alguns dos valores de resistividade elétrica obtidos, o que impossibilita a realização de algumas das estimativas individuais de relação a/c. Estes valores, fora do intervalo de abrangência da curva de ajuste, tiveram que ser descartados para realização das estimativas.

Tabela 25 – Comparação entre a relação a/c efetiva e a estimada a partir do método com ajuste polinomial (CPIII-40).

Relação a/c efetiva	Relação a/c estimada	Desvio Padrão	C. V. (%)	Intervalo de variação (95% confiança)	Erro médio (%)	Erro max. (%)	Erro min. (%)
0,35	0,35	0,018	5,11	0,35 ± 0,04	4,52	9,08	0,82
0,45	0,47	0,032	6,73	0,47 ± 0,06	7,91	29,44	0,31
0,55	0,53	0,032	6,05	0,53 ± 0,06	10,19	21,03	1,32
0,65	0,65	0,049	7,55	0,65 ± 0,1	11,29	25,03	0,47

Os valores estimados a partir do método foram próximos aos valores efetivos, para todas as misturas analisadas. Neste caso, as estimativas realizadas apresentaram erros efetivos médios levemente superiores, entre 4,52% e 11,29%. De qualquer modo, os valores obtidos para o desvio padrão e o coeficiente de variação ainda permitiram a realização das estimativas. Deve-se levar em consideração que algumas das leituras de resistividade elétrica foram descartadas da realização das estimativas de a/c, uma vez que se encontravam fora do intervalo de abrangência da Equação 19. Este detalhe mostra a importância de realizar estimativas apenas dentro do intervalo da curva de calibração e, em casos reais, a necessidade de obter resultados de calibração que extrapolem os possíveis valores empregados nas misturas.

Em função do modelo de ajuste polinomial utilizado não ter possibilitado a estimativa de relação a/c de todas as leituras de resistividade elétrica obtidas, foi realizada também, em específico para o cimento CPIII-40, a análise de correlação com uma curva de ajuste logarítmica, que possibilitou a utilização de todos os dados de resistividade obtidos. A Figura 27 apresenta a relação entre a resistividade elétrica do concreto no estado fresco e a relação água/cimento, para este caso, a partir dos resultados apresentados na Tabela 24.

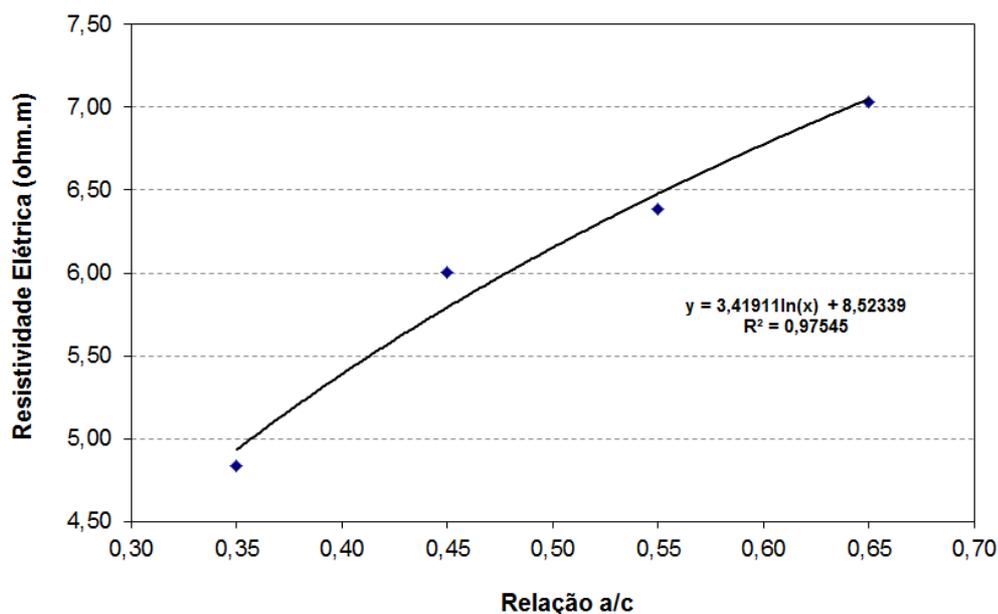


Figura 27 – Relação entre resistividade elétrica e relação a/c do concreto fresco com ajuste logarítmico (CPIII-40).

A curva de correlação obtida a partir da Figura 27, também forneceu um ajuste com um coeficiente de determinação (R^2) de 97,55%, sendo utilizada para realização da estimativa dos valores de relação água/cimento, a partir das medições de resistividade do concreto, no estado fresco. A solução da equação logarítmica, utilizada para determinação dos valores de relação a/c, é descrita através da Equação 20.

$$a/c = e^{\left(\frac{\rho - 8,5234}{3,4191}\right)} \quad \text{Equação 20}$$

A partir da inserção dos valores de resistividade elétrica (ρ) obtidos experimentalmente (Tabela 23) na Equação 20 e através da solução das respectivas equações logarítmicas, foi possível obter as estimativas dos valores de relação a/c, sendo os resultados apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Comparação entre a relação a/c efetiva e a estimada a partir do método (CPIII-40).

Relação a/c efetiva	Relação a/c estimada	Desvio Padrão	C. V. (%)	Intervalo de variação (95% confiança)	Erro médio (%)	Erro max. (%)	Erro min. (%)
0,35	0,34	0,019	5,69	0,34 ± 0,04	5,34	11,21	1,78
0,45	0,48	0,034	7,02	0,48 ± 0,07	9,38	32,36	0,21
0,55	0,54	0,030	5,67	0,54 ± 0,06	8,24	18,33	0,18
0,65	0,65	0,039	6,06	0,65 ± 0,08	9,13	22,36	0,91

Os valores estimados a partir do ajuste logarítmico também foram próximos aos valores efetivos, para todas as misturas analisadas. Apesar da boa correlação apresentada para o cimento CPIII-40, a curva de ajuste logarítmica não correspondeu ao comportamento da variação da resistividade em função da relação a/c para os demais cimentos, o que fez que fosse mantido o ajuste polinomial para todos os casos. Neste caso, as estimativas realizadas apresentaram erros efetivos médios levemente superiores, com relação aos demais cimentos, entre 5,34% e 9,38%, com o maior erro médio obtido pouco inferior ao obtido através do ajuste polinomial. De qualquer modo, os valores obtidos para o desvio padrão e o coeficiente de variação permitiram uma boa precisão para as estimativas realizadas.

4.2.4 CII-Z-32

São apresentados na Tabela 27 os resultados dos ensaios de resistividade elétrica do concreto no estado fresco, obtidos pelas amostras confeccionadas com CII-Z-32.

Tabela 27 – Resistividade elétrica do concreto fresco com CII-Z-32, em função do tempo, para diferentes relações a/c.

Resistividade elétrica ($\Omega.m$) para as diferentes misturas (CII-Z-32)								
Relação a/c	0,35		0,45		0,55		0,65	
Tempo (min)	Amostra 1	Amostra 2						
0	2,55	2,35	2,89	2,83	3,05	3,13	3,84	3,80
10	2,44	2,27	2,74	2,85	3,17	3,15	3,71	3,93
20	2,30	2,21	2,87	2,80	3,25	3,24	3,96	3,96
30	2,40	2,44	2,87	2,77	3,15	3,15	4,01	3,92
40	2,36	2,42	2,83	2,91	3,26	3,35	4,00	4,05
50	2,39	2,46	2,92	2,82	3,37	3,33	4,07	4,09
60	2,34	2,43	2,92	2,90	3,22	3,25	4,12	4,06
70	-	-	2,87	2,97	3,25	3,16	4,22	3,92
80	-	-	2,95	2,90	3,28	3,22	3,84	4,00
90	-	-	2,85	2,85	3,25	3,24	3,74	3,94
100	-	-	2,88	2,93	3,29	3,28	3,83	3,96
110	-	-	2,88	2,90	3,21	3,15	3,63	3,94
120	-	-	3,04	2,96	3,15	3,18	3,66	3,99
ρ_{med} ($\Omega.m$)	2,38		2,88		3,22		3,93	

A Figura 28 ilustra o comportamento da resistividade elétrica ao longo das idades iniciais, para o concreto no estado fresco, confeccionado com o cimento CII-Z-32, a partir dos resultados apresentados na Tabela 27.

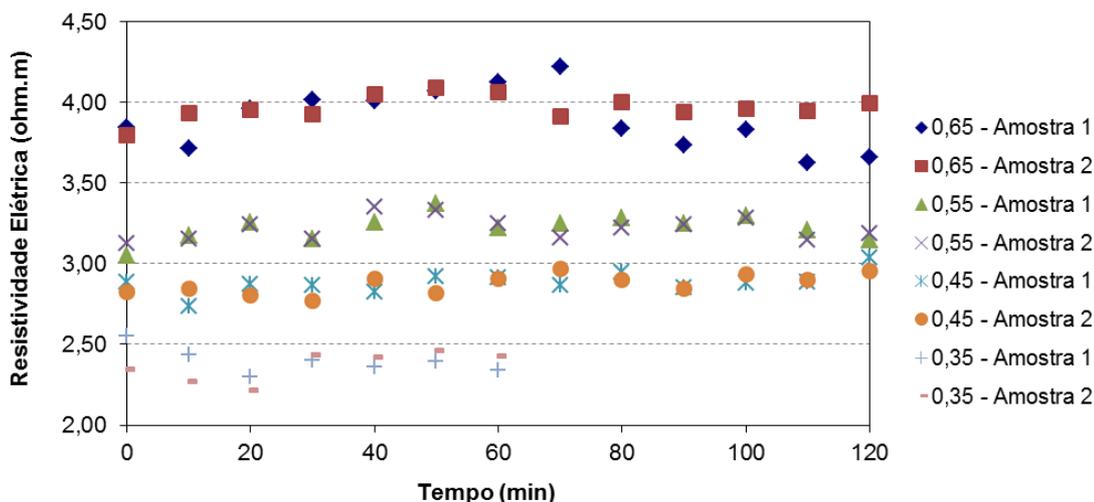


Figura 28 – Variação da resistividade elétrica no tempo (CPII-Z-32).

É possível observar, a partir da Figura 28 e dos resultados da Tabela 27, que os valores de resistividade elétrica foram superiores à medida que foram aumentados os valores de relação a/c da mistura, assim como esperado. Além disso, é possível perceber que as amostras independentes, utilizadas para realização das medições, apresentaram comportamentos bastante similares, para uma mesma mistura.

A Tabela 28 apresenta os valores médios de resistividade elétrica, medidos em função da relação água/cimento da mistura, para o cimento CPII-Z-32.

Tabela 28 – Relação a/c e a resistividade elétrica do concreto fresco (CPII-Z-32).

Relação a/c efetiva	ρ_{med} ($\Omega.m$)	Desv. Padrão ($\Omega.m$)	C.V. (%)
0,35	2,38	0,100	4,20
0,45	2,88	0,088	3,04
0,55	3,22	0,107	3,33
0,65	3,93	0,165	4,20

Tomando-se como referência os resultados médios apresentados na Tabela 28, é possível perceber que o aumento na relação a/c de 0,35 para 0,45 gerou um crescimento no valor médio de resistividade elétrica na ordem de 24,2%; já a variação para 0,55 resultou num acréscimo na ordem de 32,3%; enquanto que, para a relação a/c de 0,65, o acréscimo foi na ordem de 45,6%, com relação à menor relação a/c.

A Figura 29 apresenta a relação entre a resistividade elétrica do concreto no estado fresco e a relação água/cimento, confeccionado com o cimento CPII-Z-32, a partir dos resultados apresentados na Tabela 28.

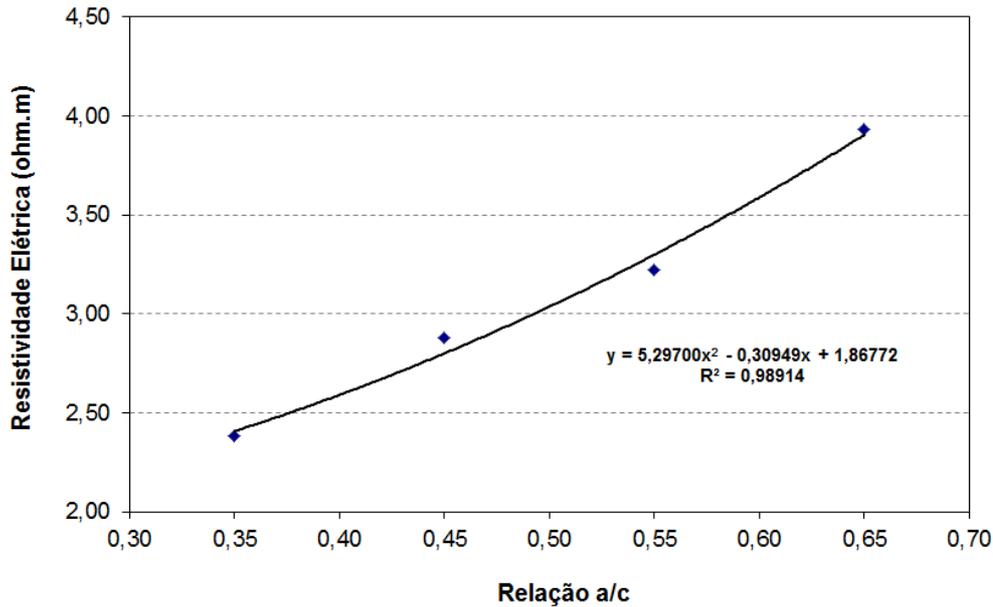


Figura 29 – Relação entre resistividade elétrica e relação a/c do concreto fresco (CPII-Z-32).

Através da análise das Figuras 28 e 29, é possível perceber uma forte correlação existente entre a resistividade elétrica do concreto no estado fresco e a relação água/cimento utilizada.

A curva de correlação, obtida a partir do gráfico da Figura 29, foi utilizada para estimativa dos valores de relação água/cimento, a partir das medições de resistividade do concreto, no estado fresco. A solução da equação quadrática, utilizada para determinação dos valores de relação a/c, é descrita através da Equação 21.

$$a/c = \frac{0,3095 + \sqrt{21,1880 \cdot \rho - 39,4775}}{10,5940} \quad \text{Equação 21}$$

A partir da inserção dos valores de resistividade elétrica (ρ) obtidos experimentalmente (Tabela 27) na Equação 21, foi possível obter as estimativas dos valores de relação a/c, sendo os resultados apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Comparação entre a relação a/c efetiva e a estimada a partir do método (CPII-Z-32).

Relação a/c efetiva	Relação a/c estimada	Desvio Padrão	C. V. (%)	Intervalo de variação (95% confiança)	Erro médio (%)	Erro max. (%)	Erro min. (%)
0,35	0,34	0,026	7,72	0,34 ± 0,05	5,78	18,28	0,65
0,45	0,47	0,014	2,97	0,47 ± 0,03	5,37	14,32	0,07
0,55	0,54	0,014	2,59	0,54 ± 0,03	4,78	13,49	0,29
0,65	0,65	0,022	3,35	0,65 ± 0,04	5,13	13,24	0,48

Os valores estimados a partir do método foram bastante próximos aos valores efetivos, para todas as misturas analisadas, sendo que as variações foram menores que 0,017. As estimativas realizadas apresentaram erros efetivos médios entre 4,78% e 5,78. Os baixos valores obtidos para o desvio padrão e o coeficiente de variação corroboram com a precisão das estimativas realizadas.

4.2.5 CII-F-32

Na Tabela 30, são apresentados os resultados dos ensaios de resistividade elétrica do concreto no estado fresco, obtidos pelas amostras confeccionadas com CII-F-32. Os resultados de resistividade elétrica são valores médios de três leituras, para cada idade, tendo o ensaio sido realizado com duas amostras independentes para cada traço.

Tabela 30 – Resistividade elétrica do concreto fresco com CII-F-32, em função do tempo, para diferentes relações a/c.

Resistividade elétrica ($\Omega.m$) para as diferentes misturas (CII-F-32)								
Relação a/c	0,35		0,45		0,55		0,65	
Tempo (min)	Amostra 1	Amostra 2						
0	2,21	2,24	2,44	2,29	2,83	2,84	3,06	3,24
10	2,16	2,18	2,38	2,38	2,77	2,72	3,23	3,10
20	2,12	2,21	2,30	2,42	2,67	2,80	3,13	3,23
30	2,12	2,21	2,38	2,43	2,75	2,77	3,16	3,13
40	2,23	2,24	2,38	2,39	2,83	2,69	3,31	3,20
50	2,27	2,14	2,53	2,48	2,81	2,83	3,17	3,28
60	2,14	2,12	2,57	2,49	2,81	2,87	3,14	3,21
70	-	-	2,46	2,36	2,69	2,86	3,13	3,16
80	-	-	2,39	2,29	2,79	2,77	3,21	3,06
90	-	-	2,48	2,35	2,80	2,74	3,14	3,08
100	-	-	2,47	2,37	2,75	2,75	3,05	3,25
110	-	-	2,56	2,53	2,76	2,93	3,17	3,18
120	-	-	2,67	2,45	2,76	2,86	3,20	3,17
ρ_{med} ($\Omega.m$)	2,19		2,43		2,79		3,17	

A Figura 30 ilustra o comportamento da resistividade elétrica ao longo das idades iniciais, para o concreto no estado fresco, confeccionado com o cimento CII-F-32, a partir dos resultados apresentados na Tabela 30.

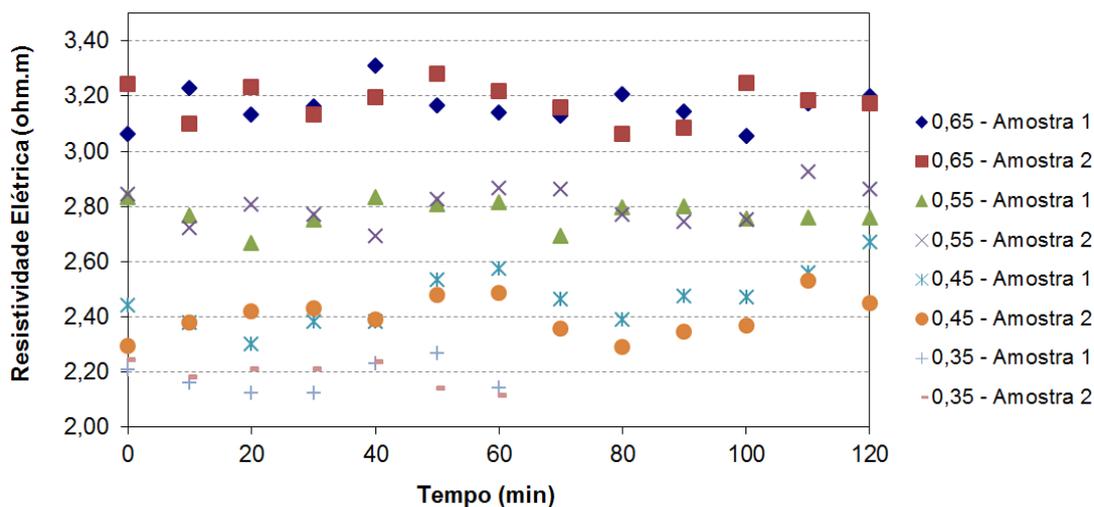


Figura 30 – Variação da resistividade elétrica no tempo (CPII-F-32).

É possível observar, a partir da Figura 30 e dos resultados da Tabela 30, que os valores de resistividade elétrica foram superiores à medida que foram aumentados os valores de relação a/c da mistura, assim como esperado. Além disso, é possível perceber que as amostras independentes, utilizadas para realização das medições, apresentaram comportamentos similares, para uma mesma mistura.

A Tabela 31 apresenta os valores médios de resistividade elétrica, medidos em função da relação água/cimento da mistura, para o cimento CPII-F-32.

Tabela 31 – Relação a/c e a resistividade elétrica do concreto fresco (CPII-F-32).

Relação a/c efetiva	ρ_{med} ($\Omega.m$)	Desv. Padrão ($\Omega.m$)	C.V. (%)
0,35	2,19	0,070	3,19
0,45	2,43	0,103	4,22
0,55	2,79	0,087	3,13
0,65	3,17	0,090	2,82

Tomando-se como referência os resultados médios apresentados na Tabela 31, é possível perceber que o aumento na relação a/c de 0,35 para 0,45 gerou um crescimento no valor médio de resistividade elétrica na ordem de 24,2%; já a variação para 0,55 resultou num acréscimo na ordem de 32,3%; enquanto que, para a relação a/c de 0,65, o acréscimo foi na ordem de 45,6%, com relação à menor relação a/c.

A Figura 31 apresenta a relação entre a relação água/cimento e a resistividade elétrica do concreto no estado fresco, confeccionado com o cimento CPII-F-32, a partir dos resultados apresentados na Tabela 31.

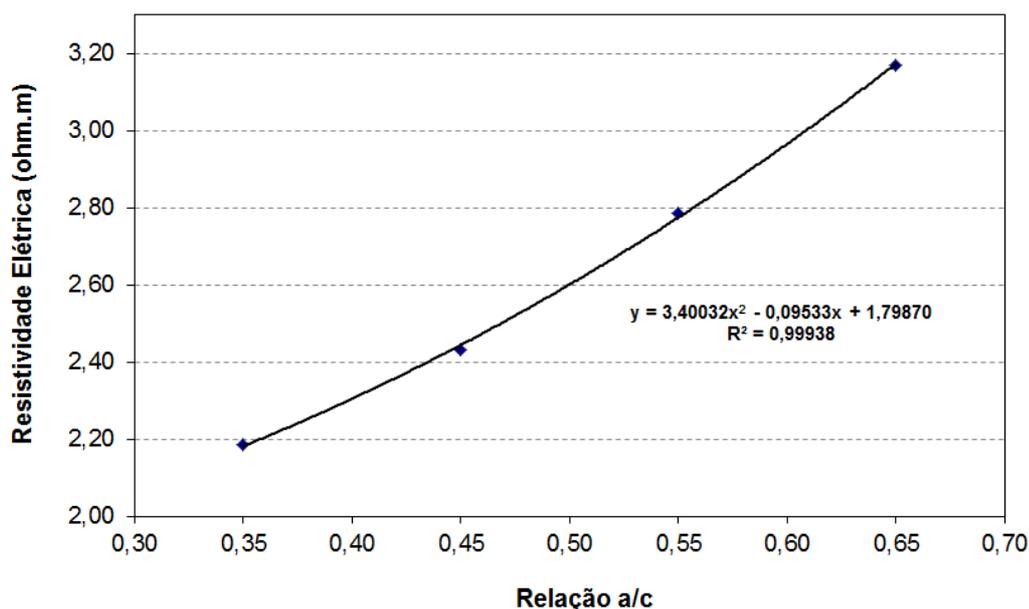


Figura 31 – Relação entre resistividade elétrica e relação a/c do concreto fresco (CPII-F-32).

Através da análise das Figuras 30 e 31, é possível perceber uma forte correlação existente entre a resistividade elétrica do concreto no estado fresco e a relação água/cimento utilizada.

A curva de correlação, obtida a partir do gráfico da Figura 31, foi utilizada para estimativa dos valores de relação água/cimento, a partir das medições de resistividade do concreto, no estado fresco. A solução da equação quadrática, utilizada para determinação dos valores de relação a/c, é descrita através da Equação 22.

$$a/c = \frac{0,0953 + \sqrt{13,6013 \cdot \rho - 24,4555}}{6,8006} \quad \text{Equação 22}$$

A partir da inserção dos valores de resistividade elétrica (ρ) obtidos experimentalmente (Tabela 30) na Equação 22, foi possível obter as estimativas dos valores de relação a/c, sendo os resultados apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – Comparação entre a relação a/c efetiva e a estimada a partir do método (CPII-F-32).

Relação a/c efetiva	Relação a/c estimada	Desvio Padrão	C. V. (%)	Intervalo de variação (95% confiança)	Erro médio (%)	Erro max. (%)	Erro min. (%)
0,35	0,35	0,022	6,36	0,35 ± 0,04	5,57	10,22	0,03
0,45	0,44	0,031	6,93	0,44 ± 0,06	7,16	20,10	0,22
0,55	0,55	0,017	3,01	0,55 ± 0,03	3,84	11,36	0,31
0,65	0,65	0,015	2,37	0,65 ± 0,03	3,46	8,71	0,02

Os valores estimados a partir do método foram bastante próximos aos valores efetivos, para todas as misturas analisadas, sendo que as variações foram menores que 0,005. As estimativas realizadas apresentaram erros efetivos médios entre 3,46% e 7,16%, o que evidencia a qualidade do ensaio para a estimativa da relação a/c. Os baixos valores obtidos para o desvio padrão e o coeficiente de variação corroboram com a precisão das estimativas realizadas.

4.2.6 CII-E-40

São apresentados, na Tabela 33, os resultados dos ensaios de resistividade elétrica do concreto no estado fresco, obtidos pelas amostras confeccionadas com CII-E-40. Os resultados de resistividade elétrica são valores médios de três leituras, para cada idade, tendo o ensaio sido realizado com duas amostras independentes para cada traço.

Tabela 33 – Resistividade elétrica do concreto fresco com CII-E-40, em função do tempo, para diferentes relações a/c.

Resistividade elétrica ($\Omega \cdot m$) para as diferentes misturas (CII-E-40)								
Relação a/c	0,35		0,45		0,55		0,65	
Tempo (min)	Amostra 1	Amostra 2						
0	2,58	2,54	3,17	3,29	4,14	4,07	4,79	4,87
10	2,65	2,52	3,22	3,31	4,23	4,27	4,93	5,11
20	2,58	2,68	3,19	3,32	4,32	4,25	5,05	4,92
30	2,67	2,52	3,33	3,35	4,36	4,14	5,02	4,77
40	2,56	2,60	3,34	3,35	4,21	4,12	4,99	4,88
50	2,68	2,62	3,30	3,32	4,25	4,28	5,00	4,81
60	2,73	2,71	3,25	3,42	4,29	4,08	4,85	4,99
70	-	-	3,28	3,31	4,16	4,26	5,01	5,19
80	-	-	3,25	3,45	4,29	4,17	5,17	5,05
90	-	-	3,27	3,44	4,31	4,24	5,02	5,16
100	-	-	3,27	3,35	4,25	4,20	4,92	4,99
110	-	-	3,27	3,35	4,29	4,30	4,91	5,07
120	-	-	3,22	3,31	4,28	4,30	4,89	5,20
ρ_{med} ($\Omega \cdot m$)	2,62		3,30		4,23		4,98	

O gráfico da Figura 32 ilustra o comportamento da resistividade elétrica ao longo das idades iniciais, para o concreto no estado fresco, confeccionado com o cimento CII-E-40, a partir dos resultados apresentados na Tabela 33.

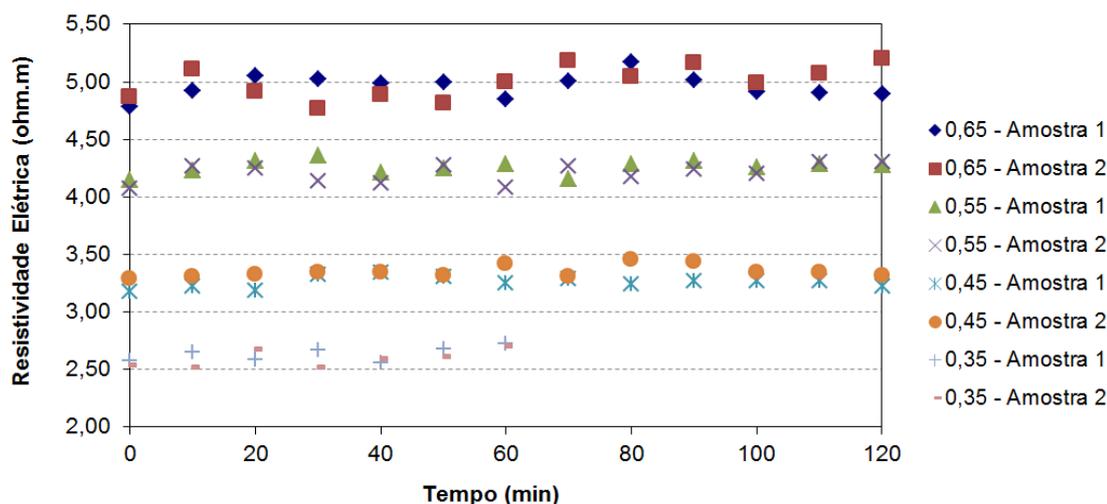


Figura 32 – Variação da resistividade elétrica no tempo (CPII-E-40).

É possível observar, a partir da Figura 32 e dos resultados da Tabela 33, que os valores de resistividade elétrica foram superiores à medida que foram aumentados os valores de relação a/c da mistura, assim como esperado. Além disso, é possível perceber que as amostras independentes, utilizadas para realização das medições, apresentaram comportamentos bastante similares, para uma mesma mistura.

A Tabela 34 apresenta os valores médios de resistividade elétrica, medidos em função da relação água/cimento da mistura, para o cimento CPII-E-40.

Tabela 34 – Relação a/c e a resistividade elétrica do concreto fresco (CPII-E-32).

Relação a/c efetiva	ρ_{med} ($\Omega.m$)	Desv. Padrão ($\Omega.m$)	C.V. (%)
0,35	2,62	0,120	4,60
0,45	3,30	0,100	3,02
0,55	4,23	0,101	2,39
0,65	4,98	0,152	3,05

Tomando-se como referência os resultados médios apresentados na Tabela 34, é possível perceber que o aumento na relação a/c de 0,35 para 0,45 gerou um crescimento no valor médio de resistividade elétrica na ordem de 24,2%; já a variação para 0,55 resultou num acréscimo na ordem de 32,3%; enquanto que, para a relação a/c de 0,65, o acréscimo foi na ordem de 45,6%, com relação à menor relação a/c.

A Figura 33 apresenta a relação entre a relação água/cimento e a resistividade elétrica do concreto no estado fresco, confeccionado com o cimento CPII-E-40, a partir dos resultados apresentados na Tabela 34.

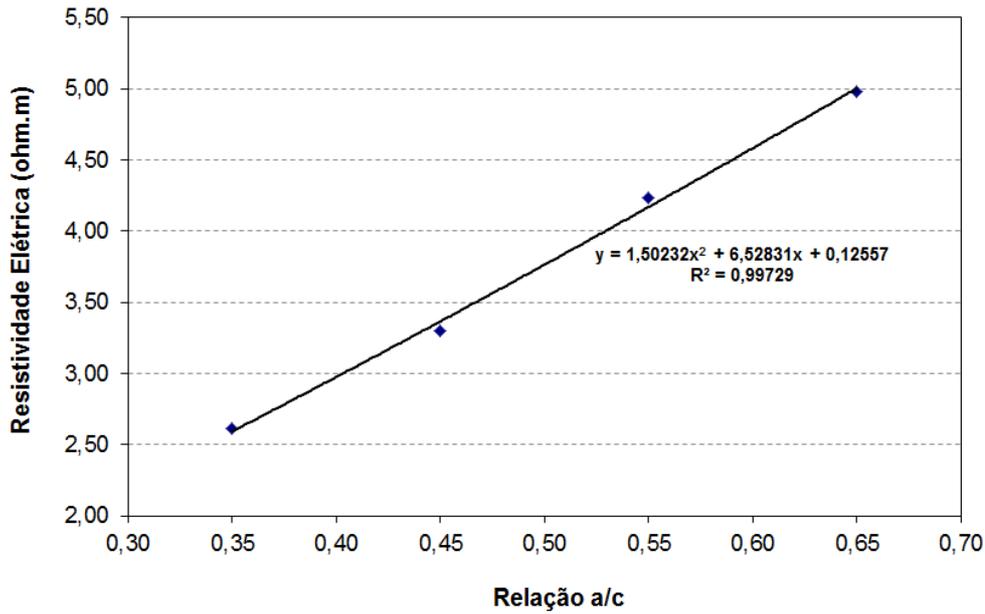


Figura 33 – Relação entre resistividade elétrica e relação a/c do concreto fresco (CPII-E-40).

Através da análise das Figuras 32 e 33, é possível perceber uma forte correlação existente entre a resistividade elétrica do concreto no estado fresco e a relação água/cimento utilizada.

A curva de correlação, obtida a partir do gráfico da Figura 33, foi utilizada para estimativa dos valores de relação água/cimento, a partir das medições de resistividade do concreto, no estado fresco. A solução da equação quadrática, utilizada para determinação dos valores de relação a/c, é descrita através da Equação 23.

$$a/c = \frac{-6,5283 + \sqrt{6,0093 \cdot \rho + 41,8642}}{3,0046} \quad \text{Equação 23}$$

A partir da inserção dos valores de resistividade elétrica (ρ) obtidos experimentalmente (Tabela 33) na Equação 23, foi possível obter as estimativas dos valores de relação a/c, sendo os resultados apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 – Comparação entre a relação a/c efetiva e a estimada a partir do método (CPII-E-40).

Relação a/c efetiva	Relação a/c estimada	Desvio Padrão	C. V. (%)	Intervalo de variação (95% confiança)	Erro médio (%)	Erro max. (%)	Erro min. (%)
0,35	0,35	0,009	2,60	0,35 ± 0,02	2,25	4,97	0,03
0,45	0,44	0,009	1,98	0,44 ± 0,02	2,86	7,04	0,71
0,55	0,56	0,009	1,65	0,56 ± 0,02	3,01	6,44	0,12
0,65	0,65	0,014	2,23	0,65 ± 0,03	3,32	7,97	0,19

Os valores estimados a partir do método foram bastante próximos aos valores efetivos, para todas as misturas analisadas, sendo que as estimativas realizadas apresentaram erros efetivos médios entre 2,25% e 3,32%, o que evidencia a qualidade do ensaio para a estimativa da relação a/c. Os baixos valores obtidos para o desvio padrão e o coeficiente de variação corroboram com a precisão das estimativas realizadas.

4.2.7 Comparação geral dos resultados de resistividade elétrica

Na sequência são apresentados os resultados dos ensaios de resistividade elétrica do concreto no estado fresco, obtidos para os cimentos estudados, para as relações a/c analisadas. A Tabela 36 apresenta um comparativo geral entre os cimentos, com os valores médios de resistividade elétrica obtidos nos ensaios.

Tabela 36 – Comparação geral entre resistividade elétrica e relação a/c para os cimentos analisados.

Relação a/c	Resistividade elétrica no estado fresco ($\Omega.m$)					
	CPII-F	CPV	CPII-Z	CPII-E	CPIV	CPIII
0,35	2,19	2,24	2,38	2,62	2,87	4,83
0,45	2,43	2,81	2,88	3,30	3,57	6,00
0,55	2,79	3,21	3,22	4,23	4,06	6,39
0,65	3,17	3,61	3,93	4,98	4,87	7,03

A Figura 34 apresenta um comparativo geral entre os cimentos analisados, com a correlação entre a relação água/cimento e a resistividade elétrica do concreto no estado fresco.

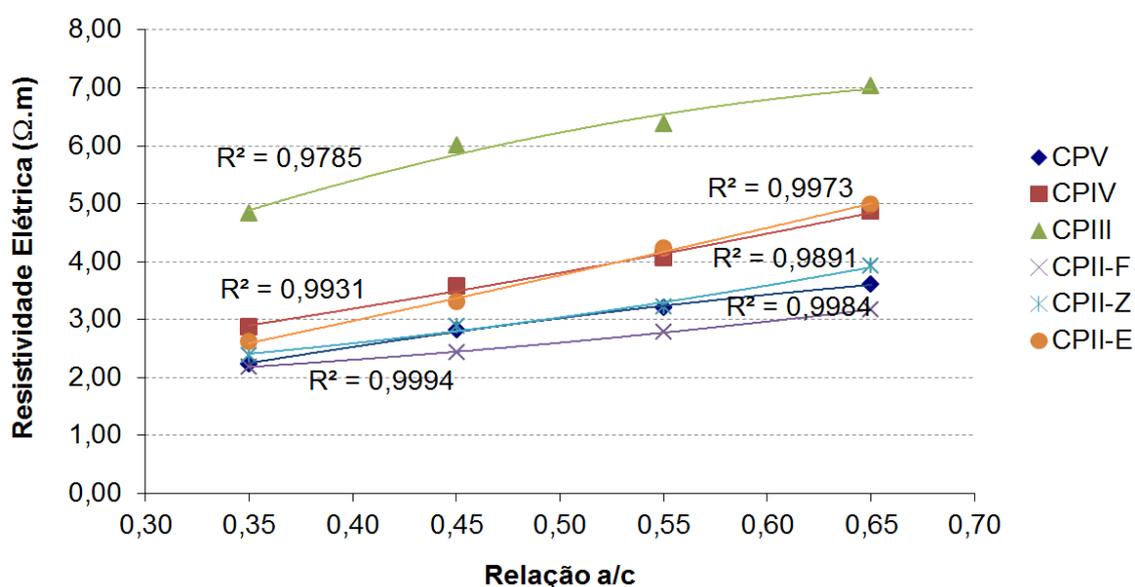


Figura 34 – Comparação geral entre a relação a/c e a resistividade elétrica dos cimentos analisados.

Pode-se perceber, a partir da análise da Figura 34 e dos resultados da Tabela 36, uma forte correlação existente entre a resistividade elétrica do concreto no estado fresco e a

relação água/cimento utilizada. Pode-se verificar um aumento da resistividade elétrica com o aumento da relação a/c, o mesmo comportamento verificado por Mancio et al. (2010). Para menores relações água/cimento, menores valores de resistividade elétrica (ou maior condutividade) foram obtidos, podendo ser atribuídos à maior concentração de íons na solução, enquanto que, para maiores relações água/cimento, a maior resistividade elétrica está associada a uma menor concentração de íons na solução do poro.

Este comportamento foi anteriormente verificado por Wei e Li (2006), que concluíram que a resistividade elétrica da solução diminui com a diminuição da relação água/cimento, o que se equivale a uma maior condutividade da solução para menores relações a/c da solução. Este comportamento é devido à maior quantidade de partículas de cimento, que contribuem para dissolução de íons (principalmente os íons OH^- , K^+ , SO_4^{2-} , e Ca^{2+}), para um menor volume de água em certas quantidades, quando utilizado um menor fator a/c.

Enquanto que alguns compostos de cimento possuem baixa solubilidade, atingindo rapidamente o grau de saturação para uma ampla gama de relações a/c testadas (como hidróxido de cálcio e gesso), outros compostos, como é o caso do potássio e dos hidróxidos de sódio, são altamente solúveis, apresentando-se dissolvidos para variadas concentrações (MANCIO et al., 2010). De acordo com Taylor (1997), as concentrações da solução do poro para os íons K^+ e Na^+ , com uma determinada relação a/c, apresentaram um rápido crescimento nos 12 minutos logo após a mistura, mas mantiveram-se praticamente constantes depois deste instante, por cerca de 3 horas.

Cabe ressaltar que as misturas de concreto testadas utilizaram quantidades fixas de água para um mesmo cimento (variando-se a quantidade de cimento para alterar os valores de a/c) e obtiveram consistências aproximadas, sendo que, por consequência, apresentaram aproximadamente a mesma “porosidade” (no estado fresco, na forma de solução saturada, a porosidade do concreto é igual à quantidade de água acrescentada e ao ar incorporado na mistura), o que fez com que a quantidade de solução do poro fosse praticamente constante para as variadas misturas. Com isso, quaisquer alterações causadas na resistividade elétrica das amostras devem ser atribuídas às características do fluido do poro (MANCIO et al., 2010).

Utilizando-se a Lei de Archie (Equação 3), a porosidade (ϕ) foi mantida constante e, por consequência, quaisquer alterações causadas da resistividade da amostra de concreto (ρ_c) devem ser atribuídas unicamente à resistividade do fluido do poro (ρ_f), o que confirma a afirmação anterior.

Quando analisada a influência do tipo de cimento utilizado nas medições de resistividade elétrica, é possível perceber que os concretos confeccionados com cimentos contendo maiores teores de adições minerais ativas, como é o caso do CPIII-40 (com até 70% de escória de alto-forno), apresentaram maiores resultados de resistividade elétrica, para todas as relações a/c investigadas. O comportamento inverso foi percebido para os cimentos com menores teores de adições minerais, como por exemplo, o CPII-F-32 e o CPV-ARI (com até 10% e 5% de material carbonático, respectivamente), que apresentaram menores valores de resistividade elétrica, para todas as relações a/c. Este comportamento pode ser atribuído à maior (CPII-F-32 e CPV-ARI) ou à menor (CPIII-40) concentração de íons dissolvidos na mistura, que contribuem para o aumento da condutividade elétrica da solução saturada. Tomando-se como referência os resultados médios apresentados na Tabela 36, é possível perceber que a alteração no cimento do CPII-F-32 para o CPV-ARI ou o CPII-Z-32, gerou um crescimento no valor médio de resistividade elétrica na ordem de 15%, uma vez que todos estes apresentam baixos teores de substituição de clínquer por adição mineral (de 5 a 25%, em massa); já a variação para os cimentos CPII-E-40 ou CPIV-32 (substituição de até 50%, em massa, por adição mineral), resultou num acréscimo na ordem de 45%; enquanto que, quando comparado ao cimento CPIII-40 (com teores de escória de alto-forno no intervalo de 35 a 70%), o acréscimo médio na resistividade foi na ordem de 130%, com relação ao CPII-F-32.

Mancio et al. (2010) obtiveram resultados semelhantes, uma vez que as amostras com substituição de 25% em massa de cimento por cinza volante, acarretaram em aumentos na resistividade elétrica na ordem de 35%. Os autores atribuíram este resultado à dissolução mais lenta obtida pela cinza, o que leva a uma solução do poro menos concentrada, ou seja, com uma maior resistividade. Da mesma forma, Wei (2004), comparando amostras de pastas de cimento, com e sem a utilização de cinza volante, percebeu que as amostras contendo cinzas apresentaram maiores valores de resistividade elétrica nos períodos iniciais da hidratação, revelando um “efeito fíler” exercido pela cinza durante este estágio. Já Manchiryal e Neithalath (2009), ao analisarem os efeitos da utilização de cinza volante em substituição ao cimento, obtiveram valores de condutividade elétrica inferiores para as amostras contendo 20% de cinzas, tanto nos ensaios com concretos, quanto para argamassas, corroborando com os resultados obtidos na pesquisa. O resultado foi atribuído à menor concentração de íons livres na solução do poro, em função da redução na quantidade de cimento em substituição às cinzas.

Como não foram obtidos os teores de adições minerais utilizados durante o processo de fabricação dos cimentos, não é possível realizar determinações precisas com base neste parâmetro. No entanto, é possível perceber que o método da resistividade elétrica obteve resultados precisos para os variados cimentos utilizados na pesquisa, o que evidencia a aplicabilidade do método para concretos com variadas adições minerais (sejam elas de origem pozolânica, de escória de alto-forno ou de fíler calcário) e para variados teores de substituição, desde que se estabeleça previamente a curva de correlação para os materiais que serão utilizados.

A partir da análise das Tabelas 19, 22, 25, 26, 29, 32 e 35, pode-se perceber que as medições de resistividade e as estimativas de relação a/c foram menos precisas para misturas de maior relação a/c. Este fato pode ser atribuído ao menor consumo de cimento e à menor coesão da mistura, comparado às misturas com menor relação a/c, sendo possível a ocorrência de exsudação e de segregação durante a realização da medição, o que explica a maior variabilidade nas medições para estas situações, mesmo realizando a mistura do material antes da realização das medições. O mesmo comportamento foi percebido por Mancio et al. (2010), que obtiveram estimativas com maior erro para misturas com maior relação a/c. Os autores alertam para a necessidade de manter um processo de mistura para estes casos, imediatamente antes da realização das medições. Mesmo tendo sido atendida a sugestão dos autores na realização deste trabalho, os resultados obtidos continuaram apresentando maior variabilidade para maiores relações a/c.

4.2.8 Análise de variância dos dados de resistividade elétrica

Com a finalidade de identificar o efeito significativo dos fatores de controle sobre as variáveis de resposta, relação água/cimento e tempo, assim como para quantificar os seus efeitos na variável resposta (resistividade elétrica), foram realizados testes de Análise de Variância (ANOVA), sendo os resultados apresentados nas Tabelas 37 a 42. Foram realizados testes de ANOVA para dois fatores, com repetição, utilizando os resultados de resistividade elétrica para todas as misturas. Cabe ressaltar que foram utilizados os resultados obtidos apenas para os 60 minutos iniciais dos testes, uma vez que este teste necessita que todas as colunas tenham o mesmo número de amostras e por terem sido realizadas medições apenas nos 60 minutos iniciais para a relação a/c de 0,35.

Tabela 37 – Análise de Variância: efeitos da relação a/c e do tempo nas medições de resistividade elétrica do concreto fresco (CPV-ARI).

ANOVA, cimento CPV-ARI, 99% de certeza

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	valor- <i>P</i>	<i>F</i> crítico
Relação a/c	13,259	3	4,420	1867,494	2,446E-32	4,568
Tempo	0,040	6	0,007	2,785	0,0298172	3,528
Tempo * Relação a/c	0,072	18	0,004	1,695	0,1020681	2,653
Erro	0,066	28	0,002	-	-	-
Total	13,437	55	-	-	-	-

Tabela 38 – Análise de Variância: efeitos da relação a/c e do tempo nas medições de resistividade elétrica do concreto fresco (CPIV-32).

ANOVA, cimento CPIV-32, 99% de certeza						
Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	valor- <i>P</i>	<i>F</i> crítico
Relação a/c	22,370	2	11,185	1297,434	2,109E-36	5,194
Tempo	1,016	12	0,085	9,820	2,026E-08	2,678
Tempo * Relação a/c	0,304	24	0,013	1,470	0,139258	2,302
Erro	0,336	39	0,009	-	-	-
Total	24,026	77	-	-	-	-

Tabela 39 – Análise de Variância: efeitos da relação a/c e do tempo nas medições de resistividade elétrica do concreto fresco (CPIII-40).

ANOVA, cimento CPIII-40, 99% de certeza						
Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	valor- <i>P</i>	<i>F</i> crítico
Relação a/c	39,445	3	13,148	384,631	7,519E-23	4,568
Tempo	0,624	6	0,104	3,040	0,0203695	3,528
Tempo * Relação a/c	0,269	18	0,015	0,438	0,9643846	2,653
Erro	0,957	28	0,034	-	-	-
Total	41,295	55	-	-	-	-

Tabela 40 – Análise de Variância: efeitos da relação a/c e do tempo nas medições de resistividade elétrica do concreto fresco (CPII-Z-32).

ANOVA, cimento CPII-Z-32, 99% de certeza						
Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	valor- <i>P</i>	<i>F</i> crítico
Relação a/c	14,946	2	7,473	1045,880	1,316E-34	5,194
Tempo	0,241	12	0,020	2,806	0,0073793	2,678
Tempo * Relação a/c	0,240	24	0,010	1,398	0,1721771	2,302
Erro	0,279	39	0,007	-	-	-
Total	15,706	77	-	-	-	-

Tabela 41 – Análise de Variância: efeitos da relação a/c e do tempo nas medições de resistividade elétrica do concreto fresco (CPII-F-32).

ANOVA, cimento CPII-F-32, 99% de certeza						
Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	valor- <i>P</i>	<i>F</i> crítico
Relação a/c	8,020	3	2,673	686,172	2,645E-26	4,568
Tempo	0,042	6	0,007	1,788	0,1378832	3,528

Tempo * Relação a/c	0,076	18	0,004	1,087	0,4112392	2,653
Erro	0,109	28	0,004	-	-	-
Total	8,247	55	-	-	-	-

Tabela 42 – Análise de Variância: efeitos da relação a/c e do tempo nas medições de resistividade elétrica do concreto fresco (CPII-E-40).

ANOVA, cimento CPII-E-40, 99% de certeza						
Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	valor- <i>P</i>	<i>F</i> crítico
Relação a/c	43,307	3	14,436	1910,017	1,788E-32	4,568
Tempo	0,070	6	0,012	1,539	0,2019987	3,528
Tempo * Relação a/c	0,085	18	0,005	0,622	0,852123	2,653
Erro	0,212	28	0,008	-	-	-
Total	43,673	55	-	-	-	-

Entre os itens descritos nas Tabelas 37 a 42, a coluna *SQ* representa o somatório dos quadrados, *gl* é o número de graus de liberdade e *MQ* é a média dos quadrados ($MQ = SQ/gl$). O termo *F*, conhecido como “parâmetro de Fisher”, quantifica o grau de atribuição de variância na variável explicada, ou parâmetro (neste caso, resistividade elétrica), causado por cada um dos fatores analisados (neste caso, relação água/cimento e tempo). O termo *F* é resultado da razão entre a variância de um parâmetro (resistividade) e a variância esperada se o parâmetro e o fator (relação a/c e tempo) estiverem correlacionados. Quanto maior for o valor de *F*, maior será a correlação existente entre o parâmetro e o fator (WERKEMA et al., 1996; HARRIS, 1994⁵ apud MANCIO et al, 2010). O valor de “*F* crítico” (F_{crit}) é um parâmetro de escala para o valor *F*. Se $F > F_{crit}$, o fator exerce um efeito estatístico significativo sobre o parâmetro, sendo que, quanto maior for a diferença entre os valores *F* e F_{crit} , maior a influência do fator sobre este parâmetro. A coluna com o “valor-*P*” (nível de significância) expressa a probabilidade de que qualquer correlação entre a variável explicada (resistividade) e o fator (relação a/c e tempo) seja ao acaso. Quando o valor-*P* < erro do experimento (neste caso, 1%), existem indicativos de que o fator exerça influência estatística significativa sobre o parâmetro, uma vez que, quanto menor este valor, maiores os indicativos de que a correlação entre o fator e a variável explicada não sejam ao acaso.

Através da avaliação dos resultados da Análise de Variância contidos nas Tabelas 37 a 42, pode-se perceber que o valor de *F*, para o fator relação a/c, foi muito superior ao *F* crítico, para todos os cimentos analisados, o que indica que a relação a/c tem uma significativa influência estatística na resistividade elétrica do concreto no estado fresco. Além disso, os baixos resultados obtidos para o valor-*P* (menores que 0,01), em todos os cimentos

⁵ Harris, R. J., ANOVA: An Analysis of Variance Primer, F. E. Peacock Publishers, Itasca, IL, 1994, 509 pp.

testados, indicam que há significância entre a relação água/cimento e a resistividade elétrica, com 99% de confiança, não sendo a correlação existente devida ao acaso. A influência da relação água/cimento é visível a partir dos gráficos que correlacionam este parâmetro com a resistividade elétrica (Figuras 22, 24, 26, 27, 29, 31 e 33), para todos os cimentos analisados, o que já era um indicativo da influência existente.

Já para o fator tempo, para as amostras com CPV-ARI, CPIII-40, CPII-F-32 e CPII-e-40, em função do valor de F calculado ter sido inferior ao valor de F crítico, é possível afirmar que não apresenta influência estatística significativa sobre os valores de resistividade elétrica, considerando-se apenas os 60 minutos iniciais das medições. Além disso, para estes cimentos, foram obtidos altos resultados para o valor- P (maiores do que 0,01), o que indica que as variações na resistividade com relação ao tempo são em decorrência de erros do experimento e do acaso. Já para os cimentos CPIV-32 e CPII-Z-32, o valor calculado de F foi pouco superior ao F crítico, indicando que existe leve influência significativa por parte do fator tempo, nos valores de resistividade do concreto fresco. Este fato pode estar relacionado à solubilidade da cinza contida no cimento ao longo deste período.

Já os resultados obtidos para a fonte de variação “tempo x relação a/c”, que avalia a interação entre estes dois fatores, indicam que não existe influência estatística significativa sobre as medições de resistividade, uma vez que o valor de F obtido é inferior ao F crítico, para todos os casos analisados. Além disso, os resultados obtidos para o valor- P indicam que a variação na resistividade está mais relacionada ao acaso e aos erros do experimento, do que ao fator analisado.

Cabe ressaltar que, na realização das análises de variância, foram utilizadas as leituras apenas para os 60 minutos iniciais da realização dos ensaios de resistividade. Através da observação dos gráficos que apresentam a variação da resistividade elétrica com o tempo (Figuras 21, 23, 25, 28, 30 e 32), é possível perceber visualmente, para algumas amostras, uma tendência no comportamento da resistividade com o tempo, o que indica a existência de influência por parte do tempo nos resultados. No entanto, para os cálculos de estimativa dos fatores água/cimento e de resistência à compressão deste trabalho, foram considerados como variáveis nas equações apenas os valores da relação a/c, desconsiderando a influência do tempo na variável dependente.

Com o objetivo de verificar a importância estatística dos fatores analisados de forma geral, foram realizados testes de ANOVA, utilizando-se todos os resultados obtidos em uma mesma análise (quatro relações a/c e seis cimentos, ao longo do tempo de duração do

ensaio), sendo os resultados apresentados na Tabela 43. Foi realizado um teste de ANOVA para quatro fatores, com repetição (três ensaios por idade), utilizando os resultados de resistividade elétrica para os 60 minutos iniciais dos testes. O teste também permite verificar a existência de variação significativa entre as duas amostras independentes analisadas para cada traço estudado, a partir da quantificação dos seus efeitos na variável resposta (resistividade elétrica).

Tabela 43 – Análise de Variância: comparação geral entre amostras para 60 minutos de ensaio.

ANOVA, comparação geral entre amostras, 60 minutos, 99% de certeza						
Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Cimento	1357,744	5	271,549	24132,429	0,0000000	3,045
Relação a/c	405,377	3	135,126	12008,556	0,0000000	3,811
Tempo	0,247	6	0,041	3,666	0,0013691	2,829
Amostra	0,007	1	0,007	0,661	0,4166210	6,673
Cimento * Relação a/c	41,041	15	2,736	243,153	0,0000000	2,065
Cimento * Tempo	3,370	30	0,112	9,982	0,0000000	1,725
Relação a/c * Tempo	0,673	18	0,037	3,324	0,0000043	1,961
Cimento * Amostra	0,462	5	0,092	8,213	0,0000002	3,045
Relação a/c * Amostra	0,208	3	0,069	6,169	0,0003867	3,811
Tempo * Amostra	0,054	6	0,009	0,796	0,5732024	2,829
Cimento * Relação a/c * Tempo	1,940	90	0,022	1,915	0,0000038	1,416
Cimento * Relação a/c * Amostra	0,896	15	0,060	5,307	0,0000000	2,065
Cimento * Tempo * Amostra	0,648	30	0,022	1,918	0,0024831	1,725
Relação a/c * Tempo * Amostra	0,445	18	0,025	2,199	0,0029249	1,961
Cimento * Relação a/c * Tempo * Amostra	2,385	90	0,026	2,355	0,0000000	1,416
Erro	7,562	672	0,011	-	-	-
Total	1823,06	1007	-	-	-	-

Já na Tabela 44 são apresentados os resultados da ANOVA a partir dos dados de medição obtidos apenas para as relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65, para todos os cimentos analisados, o que permite investigar os efeitos dos fatores sobre a variável resposta, para os 120 minutos de ensaio.

Tabela 44 – Análise de Variância: comparação geral entre amostras para 120 minutos de ensaio.

ANOVA, comparação geral entre amostras, 120 minutos, 99% de certeza						
Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Cimento	2030,194	5	406,039	38407,164	0,0000000	3,037
Relação a/c	283,537	2	141,768	13409,865	0,0000000	4,628
Tempo	0,625	12	0,052	4,928	0,0000001	2,204
Amostra	0,010	1	0,010	0,924	0,3365715	6,662
Cimento * Relação a/c	26,719	10	2,672	252,732	0,0000000	2,340
Cimento * Tempo	10,676	60	0,178	16,831	0,0000000	1,497
Relação a/c * Tempo	0,774	24	0,032	3,051	0,0000014	1,811

Cimento * Amostra	0,482	5	0,096	9,114	0,0000000	3,037
Relação a/c * Amostra	0,463	2	0,232	21,904	0,0000000	4,628
Tempo * Amostra	0,219	12	0,018	1,725	0,0568184	2,204
Cimento * Relação a/c * Tempo	3,302	120	0,028	2,602	0,0000000	1,353
Cimento * Relação a/c * Amostra	1,085	10	0,108	10,263	0,0000000	2,340
Cimento * Tempo * Amostra	1,488	60	0,025	2,346	0,0000001	1,497
Relação a/c * Tempo * Amostra	0,608	24	0,025	2,397	0,0001972	1,811
Cimento * Relação a/c * Tempo * Amostra	2,990	120	0,025	2,357	0,0000000	1,353
Erro	9,895	936	0,011	-	-	-
Total	2373,07	1403	-	-	-	-

A partir da avaliação dos resultados da ANOVA contidos nas Tabelas 43 e 44, pode-se perceber que o valor de F , para o fator “amostras”, foi muito inferior ao F crítico, o que indica que não existe influência estatística significativa na resistividade elétrica do concreto no estado fresco em função das amostras independentes analisadas para cada traço. O resultado obtido para o valor- P (maior do que 0,01) indica que não há significância entre a fonte de variação amostra e a resistividade elétrica, com 99% de confiança. Este resultado já era esperado, uma vez que é visível a similaridade do comportamento da resistividade elétrica ao longo do tempo para as amostras de mesma relação a/c (Figuras 21, 23, 25, 28, 30 e 32), apresentando apenas pequenas variações. Além disso, estes resultados permitem sugerir que a realização de medições em apenas uma amostra de concreto no estado fresco já possa ser considerada representativa, quanto ao desenvolvimento da metodologia de aplicação do ensaio.

Através da avaliação dos resultados obtidos para os fatores “cimento” e “relação a/c”, pode-se perceber que os valores de F obtidos, foram muito superiores aos de F crítico, para 60 e 120 minutos, o que indica que o tipo de cimento e a relação a/c exercem uma significativa influência estatística na resistividade elétrica do concreto no estado fresco. Além disso, os baixos resultados obtidos para o valor- P (muito inferiores a 0,01) indicam que há significância entre o fator cimento e a relação água/cimento, com a resistividade elétrica, com 99% de confiança, não sendo esta correlação devida ao acaso. Com relação à influência do fator água/cimento, os resultados gerais corroboram com as análises de variância individuais realizadas, de acordo com as Tabelas 37 a 42.

Já os resultados obtidos para a fonte de variação “tempo”, indicam que existe uma fraca influência estatística sobre as medições de resistividade, uma vez que o valor de F obtido é superior ao F crítico, tanto para 60, quanto para 120 minutos. No entanto, com relação aos resultados da análise de 120 minutos, foi obtido um valor F superior ao obtido para a análise de 60 minutos, o que indica que, com o aumento da duração do ensaio, o tempo

exerce maior influência sobre os resultados de resistividade. Além disso, os resultados obtidos para o valor- P complementam esta afirmação. Resultados semelhantes foram obtidos nas ANOVA's individuais, onde os resultados de quatro amostras (CPV-ARI, CPIII-40, CII-F-32 e CII-e-40) não apresentaram influência estatística significativa sobre os valores de resistividade elétrica, para 60 minutos de testes, enquanto que, para dois cimentos testados (CPIV-32 e CII-Z-32), foram obtidos elementos que indicam a existência de certa influência estatística por parte do fator tempo, nos valores de resistividade do concreto fresco. Efeitos semelhantes foram obtidos por Mancio et al. (2010), que obteve valores de F pouco inferiores ao F crítico, podendo afirmar que não existe influência estatística significativa por parte do tempo sobre os valores de resistividade elétrica. Wei e Xiao (2011), ao testar variados teores de agregados em concretos, obtiveram um comportamento decrescente nos minutos iniciais após a mistura (20 – 40 minutos iniciais), seguido da estabilização nos valores por cerca de 2 a 4 horas, dependendo do teor de agregados utilizado, e ocorrendo, então, um acréscimo nos resultados. Os autores atribuem o comportamento obtido pelas amostras ao processo de hidratação da pasta de cimento contida na matriz.

As interações de primeira, de segunda, de terceira e de quarta ordens entre os fatores apresentaram, a um nível de 99% de confiança, efeito significativo sobre a variável resistividade elétrica, sendo a interação “cimento * relação a/c” a que apresentou um maior valor F , para os casos de 60 e 120 minutos. A interação de segunda ordem, “tempo * amostra”, foi a única que não apresentou efeito significativo sobre a variável de resposta.

4.3 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

Os ensaios de resistência à compressão dos concretos foram realizados com corpos de prova cilíndricos, de acordo com o descrito em 3.2.8. O processo de cura utilizado para todas as amostras está descrito em 3.2.6. A seguir são apresentados os resultados obtidos para os concretos confeccionados com os cimentos CPV-ARI, CPIV-32, CPIII-40, CII-Z-32, CII-F-32 e CII-E-40.

4.3.1 CPV-ARI

Os resultados de resistência à compressão, obtidos pelas amostras de concreto confeccionado com CPV-ARI, são apresentados nas Tabelas 45 a 48, para as relações a/c de 0,35, 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente. Os ensaios foram realizados com idades de 3, 7, 14 e 28 dias.

Tabela 45 – Resistência à compressão dos concretos com CPV-ARI (a/c=0,35) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	38,5	29,9	33,4	33,9	4,35	12,82
7	41,2	44,8	38,1	41,4	3,35	8,09
14	37,9	49,7	45,0	44,2	5,91	13,37
28	45,6	48,8	43,2	45,9	2,82	6,15

Tabela 46 – Resistência à compressão dos concretos com CPV-ARI (a/c=0,45) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	30,1	33,3	28,7	30,7	2,38	7,77
7	37,4	30,9	37,2	35,2	3,69	10,50
14	40,0	39,2	40,2	39,8	0,53	1,34
28	38,9	42,7	40,1	40,6	1,96	4,83

Tabela 47 – Resistência à compressão dos concretos com CPV-ARI (a/c=0,55) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	25,5	27,4	29,4	27,5	1,95	7,12
7	31,4	33,8	31,3	32,2	1,41	4,39
14	33,1	36,4	40,6	36,7	3,76	10,24
28	36,4	41,5	34,2	37,4	3,76	10,05

Tabela 48 – Resistência à compressão dos concretos com CPV-ARI (a/c=0,65) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	23,1	22,8	25,7	23,9	1,61	6,73
7	23,6	27,3	27,4	26,1	2,15	8,24
14	27,2	28,6	28,5	28,1	0,77	2,76
28	32,1	29,8	32,2	31,4	1,36	4,34

A Figura 35 apresenta os resultados médios de resistência à compressão, obtidos para as amostras com as quatro relações a/c, nas idades de ensaio descritas. São apresentadas também as curvas de ajuste, que representam a evolução da resistência para as idades de ensaio.

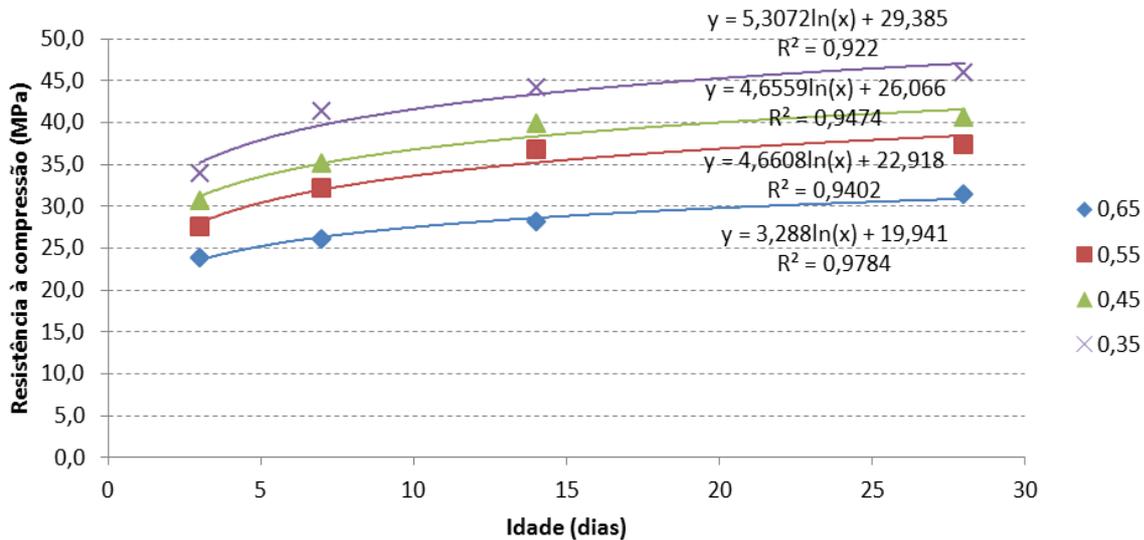


Figura 35 – Evolução da resistência à compressão do concreto com CPV-ARI.

Na Figura 36 é apresentada a influência da relação água/cimento sobre a variável de resposta resistência à compressão do concreto, para as idades analisadas. Além disso, são apresentadas as curvas de ajuste, que possibilitam a estimativa dos valores de resistência à compressão do concreto a partir dos valores de relação água/cimento, para uma idade conhecida.

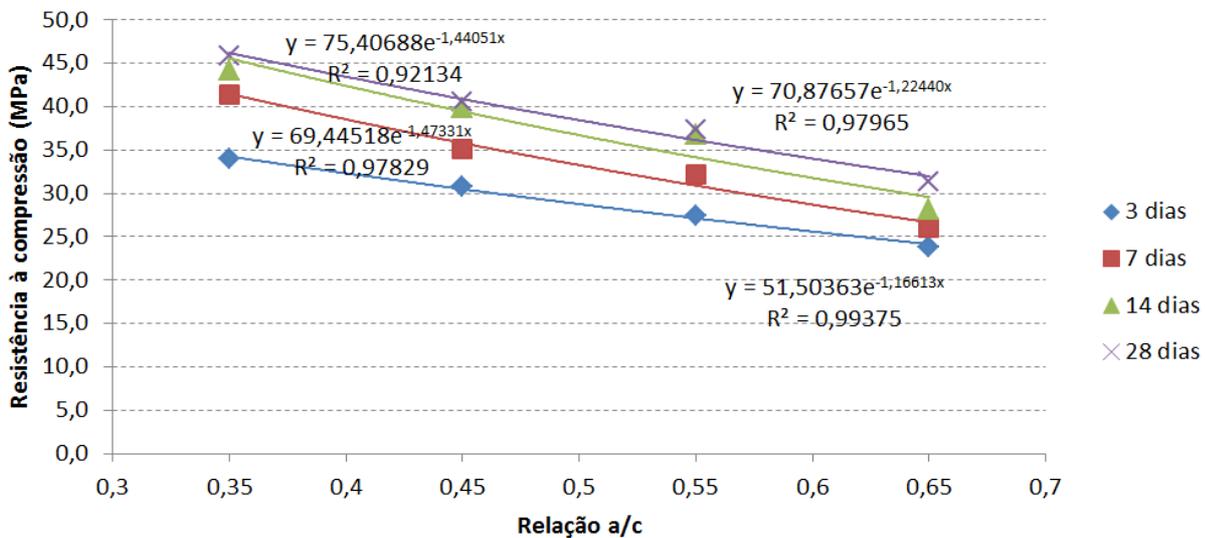


Figura 36 – Relação a/c versus resistência à compressão do concreto com CPV-ARI.

Pode-se observar, a partir das Figuras 35 e 36, que à medida que foram aumentadas as relações água/cimento, houve um decréscimo na resistência à compressão das amostras de concreto. Já com a evolução das idades, pode-se perceber um aumento das resistências, para todas as relações a/c avaliadas. Ambos os comportamentos já eram esperados. Os concretos ficaram na faixa dos 30 aos 50 MPa de resistência à compressão axial, aos 28 dias de ensaio. Para a relação a/c de 0,55, o ganho de resistência no terceiro dia foi de 74% da resistência obtida aos 28 dias, e, no sétimo dia, esta relação já subiu para 86%. A relação a/c de 0,35 apresentou uma resistência à compressão média, aos 28 dias, 13% superior à resistência obtida pela relação a/c igual a 0,45, 23% superior à resistência obtida pela relação a/c de 0,55 e 46% superior à resistência obtida pela relação a/c de 0,65.

4.3.2 CPIV-32

Nas Tabelas 49 a 52 são apresentados os valores de resistência à compressão, obtidos pelas amostras de concreto confeccionado com CPIV-32, para as relações a/c de 0,35, 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente. Os ensaios foram realizados com idades de 3, 7, 14 e 28 dias.

Tabela 49 – Resistência à compressão dos concretos com CPIV-32 (a/c=0,35) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	26,9	26,0	26,9	26,6	0,50	1,89
7	29,5	31,5	30,3	30,4	1,03	3,39
14	37,6	31,9	36,1	35,2	2,94	8,36
28	40,8	35,2	38,2	38,0	2,80	7,36

Tabela 50 – Resistência à compressão dos concretos com CPIV-32 (a/c=0,45) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	21,2	19,9	22,1	21,1	1,11	5,25
7	24,4	26,9	24,8	25,4	1,33	5,26
14	30,0	27,8	32,0	29,9	2,09	6,99
28	34,8	36,4	37,7	36,3	1,45	3,98

Tabela 51 – Resistência à compressão dos concretos com CPIV-32 (a/c=0,55) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	18,1	19,0	19,2	18,8	0,56	2,98

7	23,5	21,9	18,8	21,4	2,38	11,13
14	25,7	25,1	24,1	24,9	0,78	3,11
28	25,5	32,1	34,7	30,8	4,73	15,35

Tabela 52 – Resistência à compressão dos concretos com CPIV-32 (a/c=0,65) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	14,0	11,9	12,7	12,9	1,08	8,43
7	16,4	16,6	15,2	16,1	0,72	4,48
14	17,8	16,8	18,4	17,7	0,81	4,60
28	23,2	22,8	20,1	22,1	1,67	7,56

Na Figura 37 são apresentados os valores médios de resistência à compressão dos concretos com CPIV-32, obtidos com as quatro relações a/c, nas idades de ensaio descritas, assim como as curvas de ajuste obtidas.

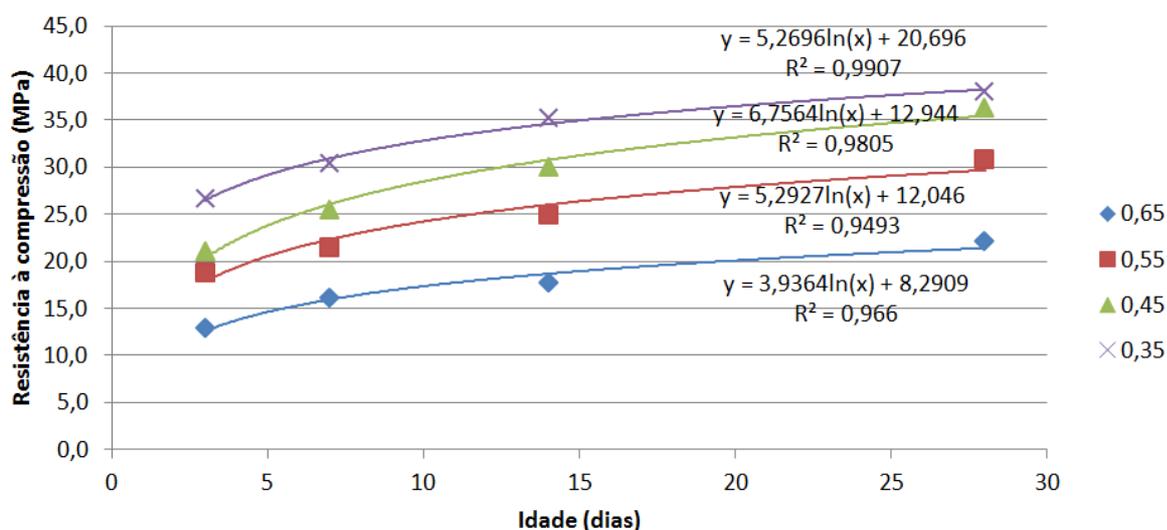


Figura 37 – Evolução da resistência à compressão do concreto com CPIV-32.

Já a Figura 38 apresenta a influência da relação água/cimento sobre a variável de resposta resistência à compressão do concreto, para as idades analisadas. As curvas de ajuste, que possibilitam a estimativa dos valores de resistência à compressão do concreto a partir dos valores de relação água/cimento, para uma idade conhecida, também são apresentadas.

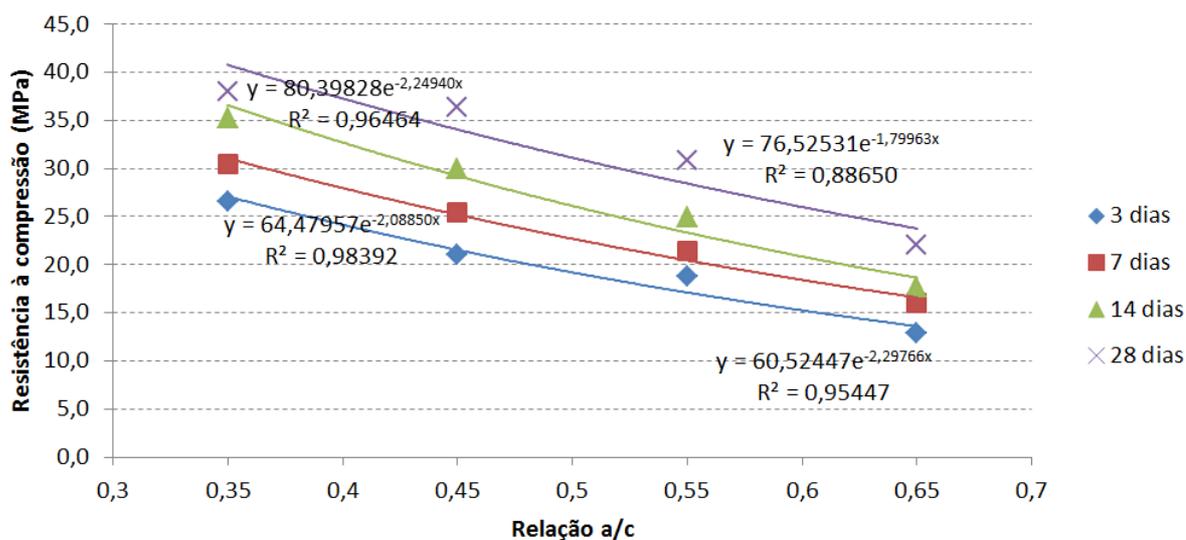


Figura 38 – Relação a/c versus resistência à compressão do concreto com CPIV-32.

Como esperado, a partir das Figuras 37 e 38, pode-se observar que com o aumento das relações água/cimento, houve um decréscimo na resistência à compressão das amostras. Já com a evolução das idades, pode-se perceber um aumento da resistência, para todas as relações água/cimento avaliadas. Os concretos ficaram na faixa dos 20 aos 40 MPa de resistência à compressão axial, aos 28 dias de ensaio. Para a relação a/c de 0,55, o ganho de resistência no terceiro dia foi de 60% da resistência obtida aos 28 dias, e, no sétimo dia, esta relação subiu para 69%. A relação a/c de 0,35 apresentou uma resistência à compressão média, aos 28 dias, 5% superior à resistência obtida pela relação a/c igual a 0,45, 23% superior à resistência obtida pela relação a/c de 0,55 e 72% superior à resistência obtida pela relação a/c de 0,65.

4.3.3 CPIII-40

As Tabelas 53 a 56 contêm os valores de resistência à compressão axial, obtidos pelas amostras de concreto confeccionado com CPIII-40, para as relações a/c de 0,35, 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente. Os ensaios foram realizados nas idades de 7 e 28 dias.

Tabela 53 – Resistência à compressão dos concretos com CPIII-40 (a/c=0,35) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
7	34,6	33,6	30,9	33,0	1,89	5,74
28	36,7	37,3	39,4	37,8	1,43	3,78

Tabela 54 – Resistência à compressão dos concretos com CIII-40 (a/c=0,45) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
7	27,0	28,8	26,8	27,5	1,10	4,01
28	30,0	36,5	35,3	33,9	3,49	10,29

Tabela 55 – Resistência à compressão dos concretos com CIII-40 (a/c=0,55) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
7	20,0	19,8	21,3	20,4	0,79	3,85
28	26,6	22,6	29,9	26,4	3,68	13,94

Tabela 56 – Resistência à compressão dos concretos com CIII-40 (a/c=0,65) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
7	17,5	15,5	16,0	16,3	1,01	6,20
28	20,6	23,0	22,5	22,0	1,22	5,54

Os resultados de resistência à compressão são apresentados na Figura 39, obtidos para as amostras com as quatro relações a/c, nas idades de ensaio descritas. São apresentadas também as curvas de ajuste, que correlacionam a evolução da resistência com as idades de ensaio.

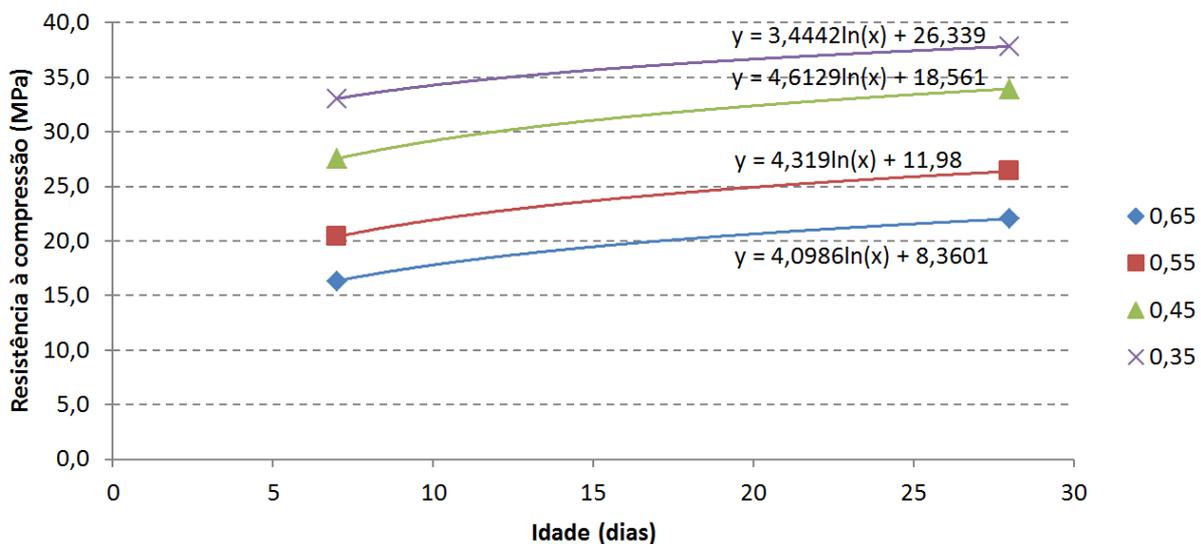


Figura 39 – Evolução da resistência à compressão do concreto com CIII-40.

Na Figura 39 são apresentados os valores médios de resistência à compressão axial com relação à relação água/cimento, para as idades de teste. São apresentadas também as curvas de ajuste, que possibilitam a estimativa dos valores de resistência à compressão do concreto a partir dos valores de relação água/cimento, para uma idade conhecida.

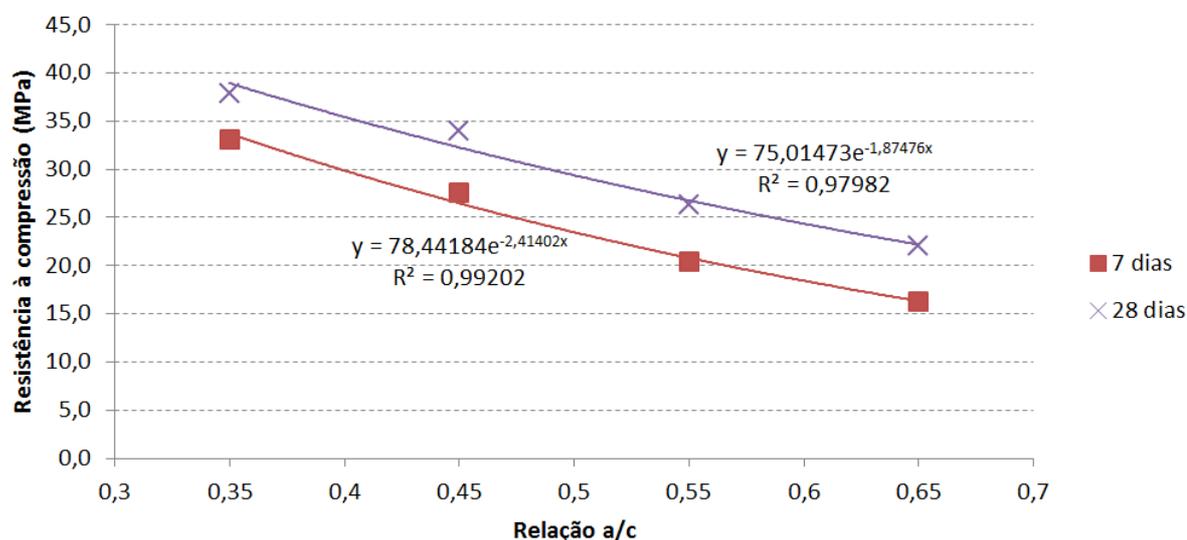


Figura 40 – Relação a/c versus resistência à compressão do concreto com CIII-40.

A partir da análise das Figuras 39 e 40, pode-se perceber que com o aumento da relação água/cimento, houve uma diminuição na resistência à compressão das amostras. A evolução das idades também resultou em aumentos da resistência, em todas as relações água/cimento avaliadas, comportamentos estes já esperados. As amostras ficaram na faixa dos 20 aos 40 MPa de resistência à compressão axial, aos 28 dias de ensaio. Para a relação a/c de 0,55, o ganho de resistência no sétimo dia foi de 77% da resistência obtida aos 28 dias. A relação a/c de 0,35 apresentou uma resistência à compressão média, aos 28 dias, 12% superior à resistência obtida pela relação a/c igual a 0,45, 43% superior à resistência obtida pela relação a/c de 0,55 e 72% superior à resistência obtida pela relação a/c de 0,65.

4.3.4 CII-Z-32

Nas Tabelas 57 a 60 estão inseridos os valores de resistência à compressão axial, obtidos pelas amostras de concreto confeccionado com CII-Z-32, para as relações a/c de 0,35, 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente. Os ensaios foram realizados nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias.

Tabela 57 – Resistência à compressão dos concretos com CII-Z-32 (a/c=0,35) para diferentes idades.

Idade	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à	Desvio padrão	Coeficiente de
-------	--------------------------------	---------------	---------------	----------------

(dias)				compressão média (MPa)	(MPa)	variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	25,2	26,8	31,8	27,9	3,44	12,30
7	29,1	28,8	35,2	31,1	3,63	11,70
14	35,3	34,9	39,5	36,6	2,57	7,02
28	38,4	36,1	37,0	37,2	1,16	3,12

Tabela 58 – Resistência à compressão dos concretos com CII-Z-32 (a/c=0,45) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	28,0	22,4	22,1	24,2	3,29	13,62
7	27,9	28,5	29,1	28,5	0,57	2,00
14	28,6	27,6	31,2	29,1	1,84	6,32
28	35,0	34,0	32,4	33,8	1,31	3,87

Tabela 59 – Resistência à compressão dos concretos com CII-Z-32 (a/c=0,55) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	16,4	16,5	14,2	15,7	1,30	8,24
7	19,1	19,4	19,9	19,5	0,39	1,99
14	25,2	23,7	23,0	24,0	1,10	4,60
28	26,9	24,5	29,9	27,1	2,69	9,92

Tabela 60 – Resistência à compressão dos concretos com CII-Z-32 (a/c=0,65) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	11,6	14,0	12,7	12,8	1,22	9,56
7	16,5	15,8	15,4	15,9	0,53	3,32
14	17,4	21,7	18,7	19,3	2,22	11,51
28	18,3	25,1	23,5	22,3	3,55	15,91

A Figura 41 apresenta a evolução dos valores médios de resistência à compressão para os concretos confeccionados com CII-Z-32, obtidos para as quatro relações água/cimento, nas idades de ensaio descritas, assim como as curvas de ajuste obtidas.

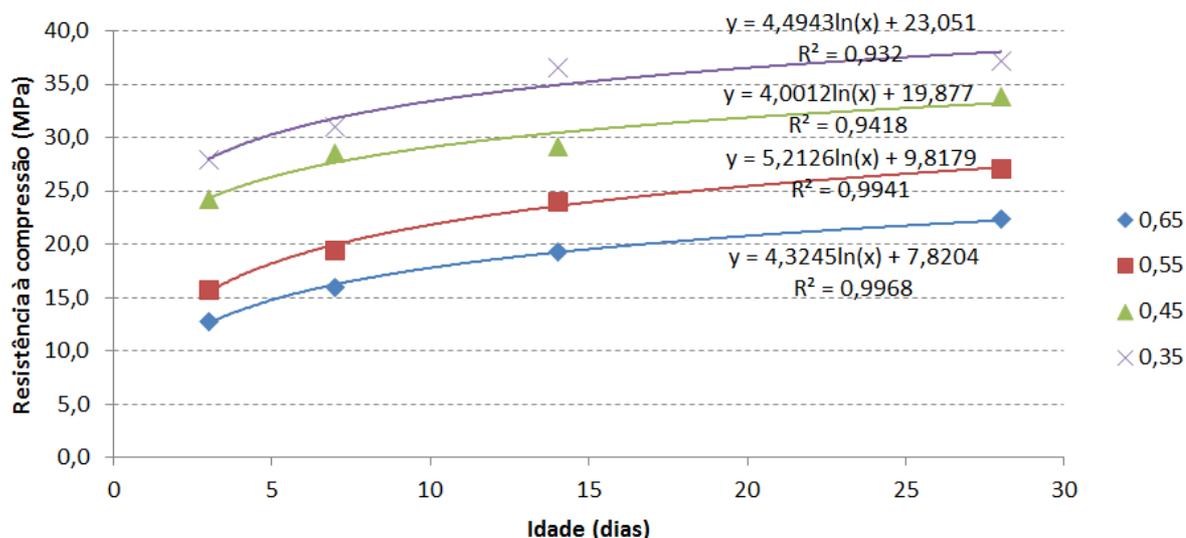


Figura 41 – Evolução da resistência à compressão do concreto com CII-Z-32.

Na Figura 42 está apresentada a influência da relação a/c sobre a variável de resposta resistência à compressão do concreto, para as idades analisadas. Também são apresentadas as curvas de ajuste, que possibilitam a estimativa dos valores de resistência à compressão do concreto a partir dos valores de relação água/cimento, para as idades conhecidas.

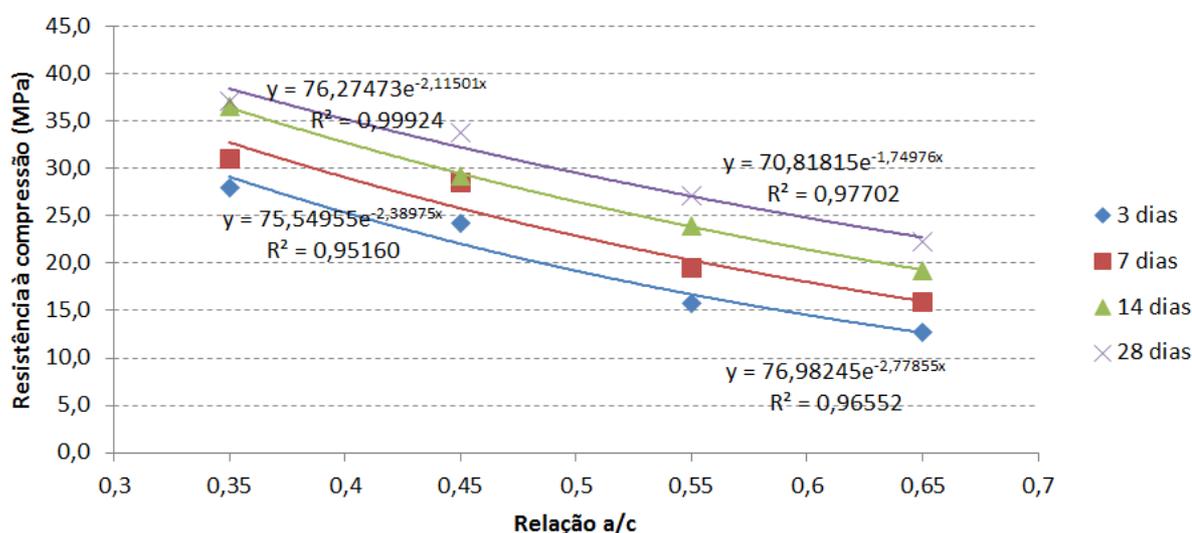


Figura 42 – Relação a/c versus resistência à compressão do concreto com CII-Z-32.

Através da análise das Figuras 41 e 42, pode-se perceber um decréscimo na resistência à compressão das amostras com o aumento das relações água/cimento. Pode-se perceber também um aumento da resistência com a evolução das idades, para todas as relações água/cimento avaliadas, sendo ambos os comportamentos já esperados para as

amostras. Os concretos ficaram na faixa dos 15 aos 40 MPa de resistência à compressão axial, aos 28 dias de ensaio. Para a relação a/c de 0,55, o ganho de resistência no terceiro dia foi de 58% da resistência obtida aos 28 dias, e, no sétimo dia, esta relação subiu para 72%. A relação a/c de 0,35 apresentou uma resistência à compressão média, aos 28 dias, 10% superior à resistência obtida pela relação a/c igual a 0,45, 37% superior à resistência obtida pela relação a/c de 0,55 e 67% superior à resistência obtida pela relação a/c de 0,65.

4.3.5 CII-F-32

Nas Tabelas 61 a 64 estão inseridos os valores de resistência à compressão axial, obtidos pelas amostras de concreto confeccionadas com CII-F-32, para as relações a/c de 0,35, 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente. Os ensaios foram realizados com idades de 3, 7, 14 e 28 dias.

Tabela 61 – Resistência à compressão dos concretos com CII-F-32 ($a/c=0,35$) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	31,6	32,3	33,9	32,6	1,17	3,58
7	36,3	36,1	33,1	35,2	1,78	5,07
14	35,4	40,6	37,2	37,8	2,61	6,92
28	33,2	40,4	37,1	36,9	3,61	9,77

Tabela 62 – Resistência à compressão dos concretos com CII-F-32 ($a/c=0,45$) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	25,6	24,9	27,7	26,1	1,46	5,60
7	29,9	28,7	28,8	29,1	0,66	2,25
14	28,5	30,8	32,5	30,6	2,02	6,59
28	31,1	31,9	34,0	32,3	1,48	4,57

Tabela 63 – Resistência à compressão dos concretos com CII-F-32 ($a/c=0,55$) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	24,4	22,3	22,1	23,0	1,26	5,50
7	27,4	25,6	24,8	25,9	1,37	5,27

14	26,5	27,8	28,1	27,5	0,83	3,03
28	29,3	30,3	24,0	27,9	3,38	12,11

Tabela 64 – Resistência à compressão dos concretos com CII-F-32 (a/c=0,65) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
3	17,2	16,7	17,0	17,0	0,28	1,65
7	20,0	19,3	19,8	19,7	0,36	1,81
14	21,5	23,4	20,0	21,6	1,73	8,02
28	19,4	20,9	23,9	21,4	2,28	10,65

Na Figura 43 está apresentada a evolução da resistência à compressão dos concretos com CII-F-32, para as quatro relações a/c analisadas, nas idades de ensaio descritas, assim como as curvas de ajuste obtidas.

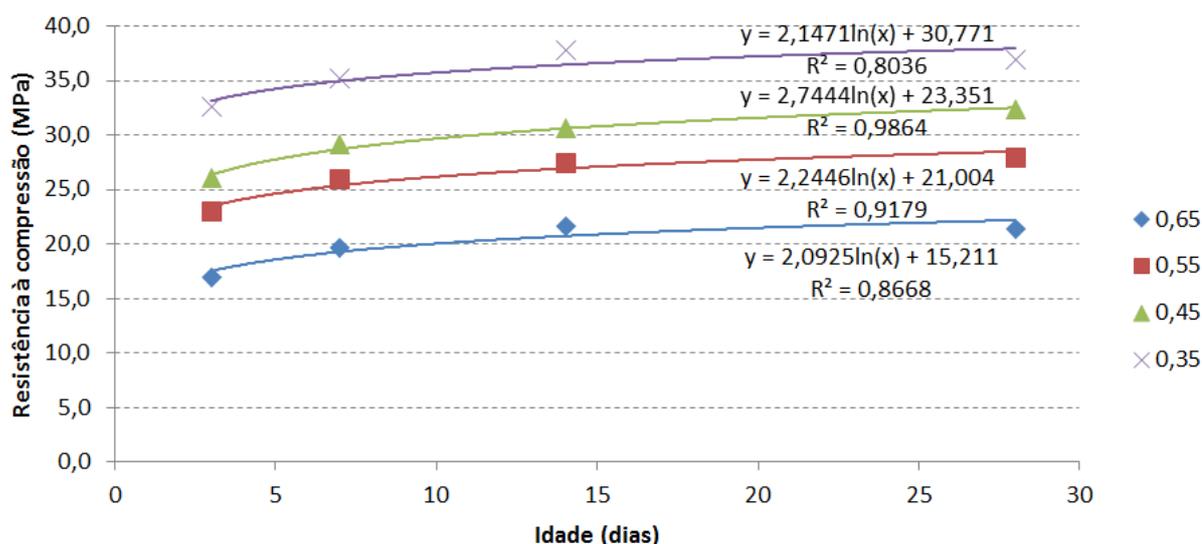


Figura 43 – Evolução da resistência à compressão do concreto com CII-F-32.

Já na Figura 44 é apresentada a influência da relação água/cimento sobre a variável de resposta resistência à compressão do concreto, para as idades analisadas. São também apresentadas as curvas de ajuste, que possibilitam a estimativa dos valores de resistência à compressão do concreto a partir dos valores de relação água/cimento, para uma idade conhecida.

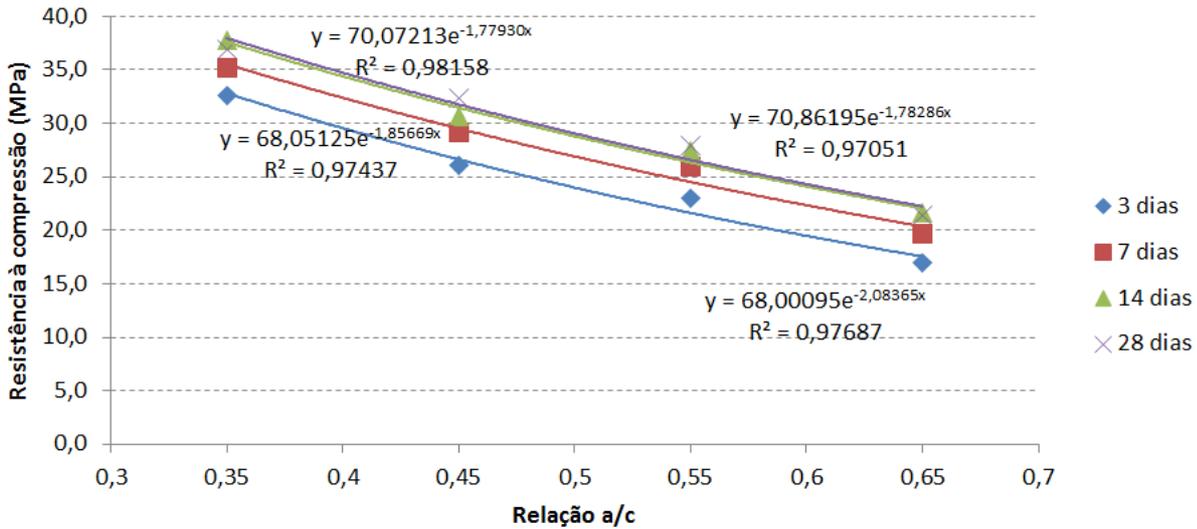


Figura 44 – Relação a/c versus resistência à compressão do concreto com CII-F-32.

A partir das Figuras 43 e 44, pode-se perceber um decréscimo na resistência à compressão das amostras com o aumento das relações água/cimento. Já com a evolução das idades, pode-se perceber um acréscimo nas resistências, para todas as relações água/cimento avaliadas. Os concretos ficaram na faixa dos 20 aos 40 MPa de resistência à compressão axial, aos 28 dias de ensaio. Para a relação a/c de 0,55, o ganho de resistência no terceiro dia foi de 82% da resistência obtida aos 28 dias, e, no sétimo dia, esta relação subiu para 93%. A relação a/c de 0,35 apresentou uma resistência à compressão média, aos 28 dias, 14% superior à resistência obtida pela relação a/c igual a 0,45, 32% superior à resistência obtida pela relação a/c de 0,55 e 72% superior à resistência obtida pela relação a/c de 0,65.

4.3.6 CII-E-40

Os resultados de resistência à compressão axial, obtidos pelas amostras de concreto confeccionado com CII-E-40, são apresentados nas Tabelas 65 a 68, para as relações a/c de 0,35, 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente. Os ensaios foram realizados nas idades de 7, 14 e 28 dias.

Tabela 65 – Resistência à compressão dos concretos com CII-E-40 (a/c=0,35) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
7	31,1	32,7	27,4	30,4	2,72	8,95
14	34,1	34,2	33,1	33,8	0,61	1,81
28	39,7	37,6	28,1	35,1	6,15	17,51

Tabela 66 – Resistência à compressão dos concretos com CII-E-40 ($a/c=0,45$) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
7	28,7	27,9	29,5	28,7	0,80	2,79
14	29,5	34,2	30,4	31,3	2,51	8,01
28	28,6	35,8	35,6	33,3	4,09	12,27

Tabela 67 – Resistência à compressão dos concretos com CII-E-40 ($a/c=0,55$) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
7	28,3	26,3	24,8	26,4	1,74	6,59
14	30,9	28,9	29,6	29,8	0,99	3,32
28	32,0	29,1	27,3	29,5	2,38	8,07

Tabela 68 – Resistência à compressão dos concretos com CII-E-40 ($a/c=0,65$) para diferentes idades.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra			
7	20,4	24,9	19,7	21,6	2,81	12,97
14	21,1	22,6	22,8	22,2	0,97	4,38
28	25,8	22,7	23,9	24,1	1,56	6,45

A Figura 45 apresenta os resultados médios de resistência à compressão, obtidos para as amostras com as quatro relações a/c , nas idades de ensaio descritas. São apresentadas também as curvas de ajuste, que representam a evolução da resistência para as idades de ensaio.

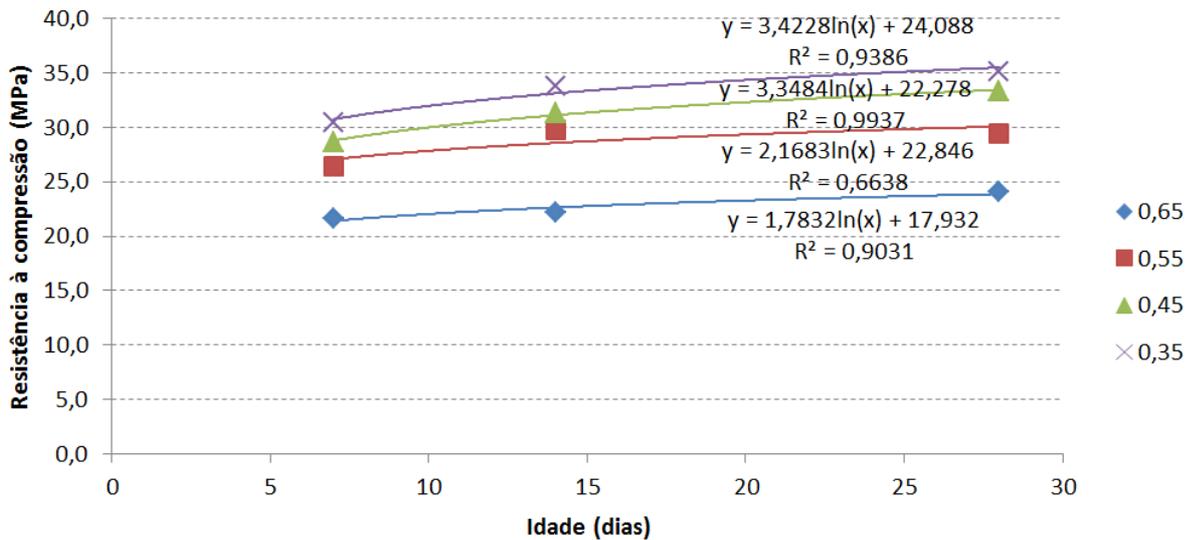


Figura 45 – Evolução da resistência à compressão do concreto com CPII-E-40.

Na Figura 46 é apresentada a influência da relação água/cimento sobre a variável de resposta resistência à compressão do concreto, para as idades analisadas. Além disso, são apresentadas as curvas de ajuste, que possibilitam a estimativa dos valores de resistência à compressão do concreto a partir dos valores de relação água/cimento, para uma idade conhecida.

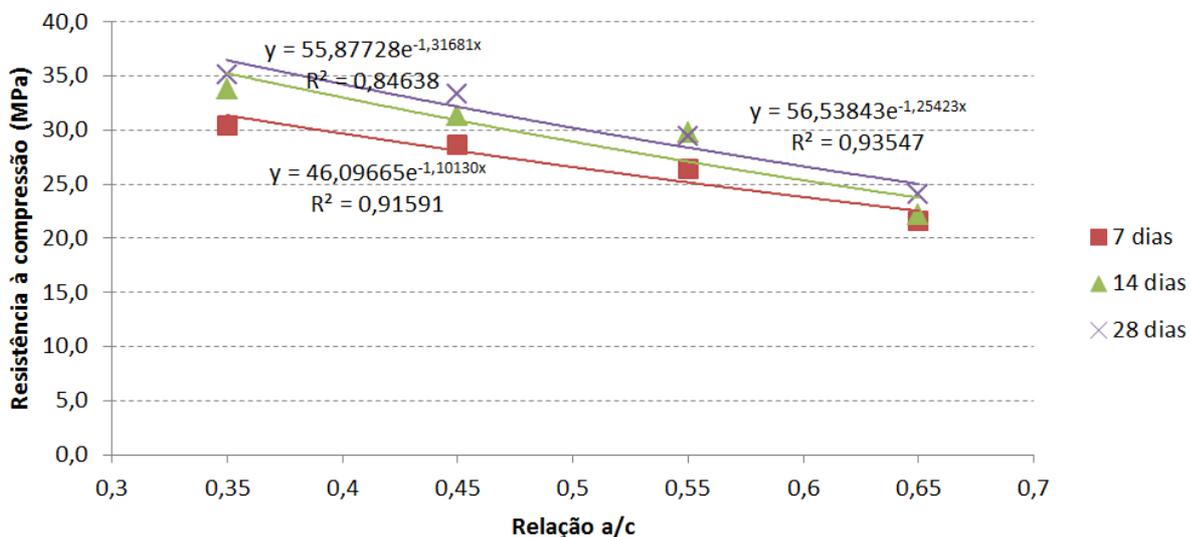


Figura 46 – Relação a/c versus resistência à compressão do concreto com CPII-E-40.

Pode-se observar que, a partir das Figuras 45 e 46, aumentos da relação água/cimento, ocasionaram num decréscimo da resistência à compressão das amostras de concreto. Já com a evolução das idades, foi possível perceber um aumento na resistência das amostras, para todas as relações a/c avaliadas, sendo ambos os comportamentos já esperados.

Os concretos ficaram na faixa dos 20 aos 40 MPa de resistência à compressão axial, aos 28 dias de ensaio. Para a relação a/c de 0,55, o ganho de resistência no sétimo dia foi de 89% da resistência obtida aos 28 dias. A relação a/c de 0,35 apresentou uma resistência à compressão média, aos 28 dias, 5% superior à resistência obtida pela relação a/c igual a 0,45, 19% superior à resistência obtida pela relação a/c de 0,55 e 46% superior à resistência obtida pela relação a/c de 0,65.

4.3.7 Comparação geral dos resultados de resistência à compressão

Na Tabela 69 são apresentados os valores de resistência à compressão axial médios, obtidos pelas amostras de concreto confeccionadas com os variados cimentos utilizados na pesquisa, aos 28 dias de idade, para as diferentes relações água/cimento investigadas.

Tabela 69 – Comparativo dos valores de resistência à compressão média para os cimentos estudados, aos 28 dias.

Resistência à compressão média dos concretos aos 28 dias (MPa)				
Cimento	Relação a/c			
	0,65	0,55	0,45	0,35
CPV-ARI	31,4	37,4	40,6	45,9
CPIV-32	22,1	30,8	36,3	38,0
CPIII-40	22,0	26,4	33,9	37,8
CPII-Z-32	22,3	27,1	33,8	37,2
CPII-F-32	21,4	27,9	32,3	36,9
CPII-E-40	24,1	29,5	33,3	35,1

A Figura 47 apresenta um comparativo entre os valores de resistência à compressão média, aos 28 dias, obtidos pelas amostras de concreto para as relações a/c investigadas.

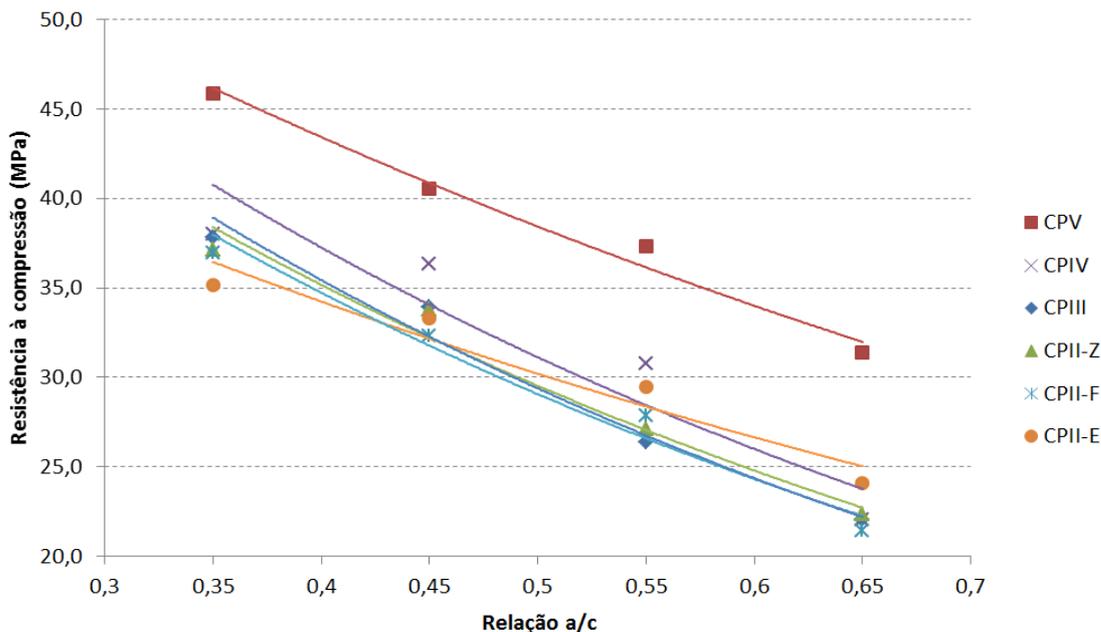


Figura 47 – Relação a/c versus resistência à compressão dos concretos, aos 28 dias.

A partir da análise dos resultados contidos na Tabela 69 e na Figura 47, pode-se perceber que todas as amostras de concreto, para os variados tipos de cimentos, apresentaram decréscimos nos valores de resistência à compressão, quando aumentada a relação água/cimento da mistura. Os concretos confeccionados com CPV-ARI apresentaram maiores valores de resistência para todas as relações a/c investigadas, aos 28 dias. Na sequência, o cimento CPIV-32 foi o que apresentou maiores resistências. O cimento CPII-E-40 apresentou maiores resultados de resistência, com relação aos demais cimentos, para as relações a/c de 0,65 e 0,55, sendo que para as relações a/c de 0,45 e 0,35 foram obtidos resultados inferiores aos demais. Os cimentos CPIII-40, CPII-Z-32 e CPII-F-32, apresentaram resistências similares aos 28 dias, com diferenças na ordem de 1MPa entre as amostras de mesma relação a/c, para as variadas relações a/c experimentadas.

É possível perceber a importância da relação água/cimento na resistência à compressão obtida pelo concreto, uma vez que variações neste parâmetro acarretam diretamente em alterações nos valores obtidos.

Na sequência serão apresentados os resultados de resistência à compressão, correlacionados com as leituras de resistividade elétrica do concreto no estado fresco, para os variados cimentos e relações a/c analisados, assim como as respectivas estimativas realizadas.

4.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO A PARTIR DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A seguir são apresentados os resultados das estimativas de resistência à compressão, obtidos a partir das leituras de resistividade elétrica do concreto no estado fresco, para os cimentos estudados. Os valores de resistência foram determinados a partir da utilização das estimativas de relação água/cimento, sendo inseridos nas equações de ajuste (resistividade elétrica *versus* relação a/c), para as idades variadas. Os erros se referem às estimativas de resistência à compressão baseadas na média de três estimativas de relação a/c (obtidas a partir dos valores de resistividade, em cada idade), tendo sido calculados a partir da Equação 16.

4.4.1 CPV-ARI

Os resultados das estimativas de resistência à compressão para o concreto com cimento CPV-ARI são apresentados a seguir. A Figura 48 apresenta um diagrama com a combinação das Figuras 22 e 36, onde é apresentada a correlação entre resistividade elétrica, relação água/cimento e resistência à compressão. Os pontos do diagrama representam os valores obtidos nos ensaios de determinação da resistividade elétrica e de resistência à compressão axial do concreto, para as variadas relações a/c. A partir das leituras de resistividade elétrica das amostras foram realizadas as estimativas de relação a/c, utilizando-se a curva de ajuste apresentada no quadrante superior da Figura 28 (ver item 4.2). Com base nas estimativas de a/c realizadas e utilizando-se as curvas de resistência à compressão *vs* relação a/c (ver item 4.3), foi possível a realização das estimativas de resistência à compressão a partir das leituras de resistividade elétrica.

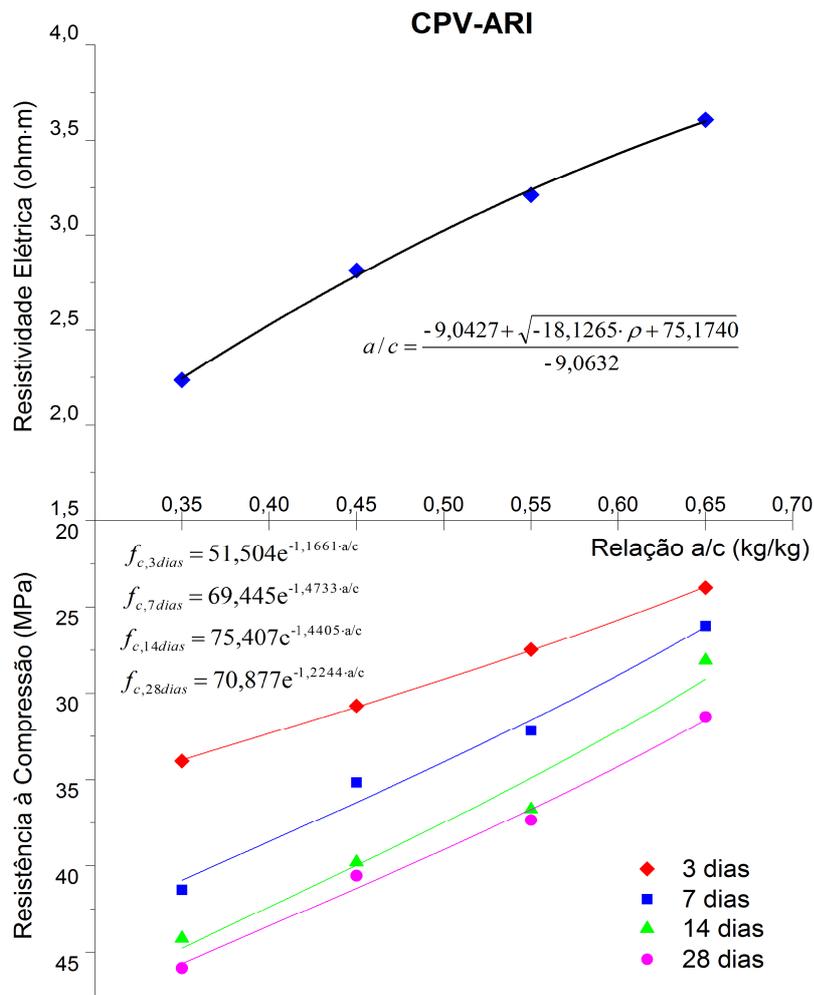


Figura 48 – Diagrama de correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão (CPV-ARI).

Através da análise da Figura 48, que apresenta a correlação entre a resistividade elétrica das amostras no estado fresco e a resistência à compressão para as variadas idades ensaiadas, é possível perceber que as amostras com menor relação a/c apresentaram menores valores de resistividade elétrica, no entanto, apresentando maiores resultados para resistência à compressão. Já para maiores relações a/c, este comportamento é inverso, uma vez que os valores de resistividade são mais altos e os resultados de resistência à compressão são menores. Com isso, é possível perceber uma relação inversa entre a resistividade elétrica das amostras no estado fresco e a resistência à compressão axial das amostras endurecidas.

A partir da Figura 48 é possível realizar a estimativa dos valores de relação água/cimento através das leituras de resistividade elétrica, e, partindo-se destas estimativas, é possível determinar os valores de resistência à compressão para as variadas idades. A Tabela 70 apresenta os valores das estimativas de resistência à compressão, obtidos a partir da utilização das estimativas de relação água/cimento, sendo inseridos nas equações de ajuste da

Figura 48, para as idades variadas. Os resultados de resistência à compressão estimada são valores médios, obtidos a partir de todas as estimativas realizadas. Os intervalos de variação para resistência estimada foram obtidos a partir de uma curva de distribuição normal, com cerca de 95% de confiança, através das médias obtidas e variando-se os valores em duas vezes o desvio padrão calculado, para mais e para menos, da mesma forma que fora realizado para as estimativas de relação a/c, apresentadas em 4.2. Os valores de erro se referem às estimativas de resistência à compressão, obtidos a partir da média de três estimativas de relação a/c (determinadas através das leituras de resistividade, em cada idade), com o seu cálculo realizado a partir da Equação 16.

Tabela 70 – Comparação entre a resistência à compressão efetiva e a estimada a partir do método (CPV-ARD).

Idade (dias)	Relação a/c	Resistência efetiva (MPa)	Resistência estimada (MPa), 95% confiança	Desvio Padrão (MPa)	C. V. (%)	Erro med. (%)	Erro max. (%)	Erro min. (%)
3	0,35	33,93	34,3 ± 0,95	0,476	1,39	1,38	3,64	0,06
	0,45	30,71	30,28 ± 1,38	0,690	2,28	1,92	7,20	0,02
	0,55	27,47	27,32 ± 1,69	0,844	3,09	2,35	7,97	0,02
	0,65	23,87	24,03 ± 1,73	0,864	3,59	2,85	9,38	0,03
7	0,35	41,39	41,56 ± 1,46	0,729	1,75	1,36	3,59	0,01
	0,45	35,17	35,49 ± 2,04	1,019	2,87	2,39	6,52	0,15
	0,55	32,16	31,17 ± 2,43	1,213	3,89	3,56	12,14	0,45
	0,65	26,09	26,51 ± 2,4	1,198	4,52	3,86	11,05	0,20
14	0,35	44,20	45,65 ± 1,57	0,783	1,72	3,28	6,47	0,42
	0,45	39,79	39,12 ± 2,2	1,099	2,81	2,33	8,77	0,03
	0,55	36,71	34,46 ± 2,62	1,312	3,81	6,13	14,73	0,96
	0,65	28,09	29,41 ± 2,6	1,300	4,42	5,85	12,45	0,28
28	0,35	45,88	46,26 ± 1,35	0,674	1,46	1,26	3,47	0,02
	0,45	40,57	40,57 ± 1,94	0,970	2,39	1,74	6,16	0,00
	0,55	37,35	36,42 ± 2,36	1,181	3,24	2,93	10,13	0,46
	0,65	31,36	31,84 ± 2,4	1,200	3,77	3,27	9,10	0,00

Através da avaliação dos resultados apresentados na Tabela 70, pode-se perceber que o método da resistividade elétrica forneceu estimativas próximas aos valores de resistência à compressão axial, obtidos experimentalmente. Os erros efetivos médios encontrados ficaram no intervalo de 1,26% a 6,13%. Assim como para as estimativas de relação água/cimento, as estimativas de resistência à compressão apresentaram maior erro quando utilizados maiores valores de relação água/cimento, uma vez que estas estimativas dependem do valor de relação água/cimento atribuído à medição. O erro máximo individual obtido foi de 14,73%, mostrando que, na pior das situações, a resistência efetiva encontra-se

num intervalo de $\pm 14,73\%$ a partir da estimativa realizada com o concreto no estado fresco, para qualquer idade analisada.

É apresentado, na Figura 49, o gráfico de correlação dos valores de resistência à compressão axial, obtidos experimentalmente para todas as relações a/c e idades ensaiadas, *versus* os valores previstos pelo método, em função das equações de correlação apresentadas na Figura 48, para os concretos confeccionados com cimento CPV-ARI.

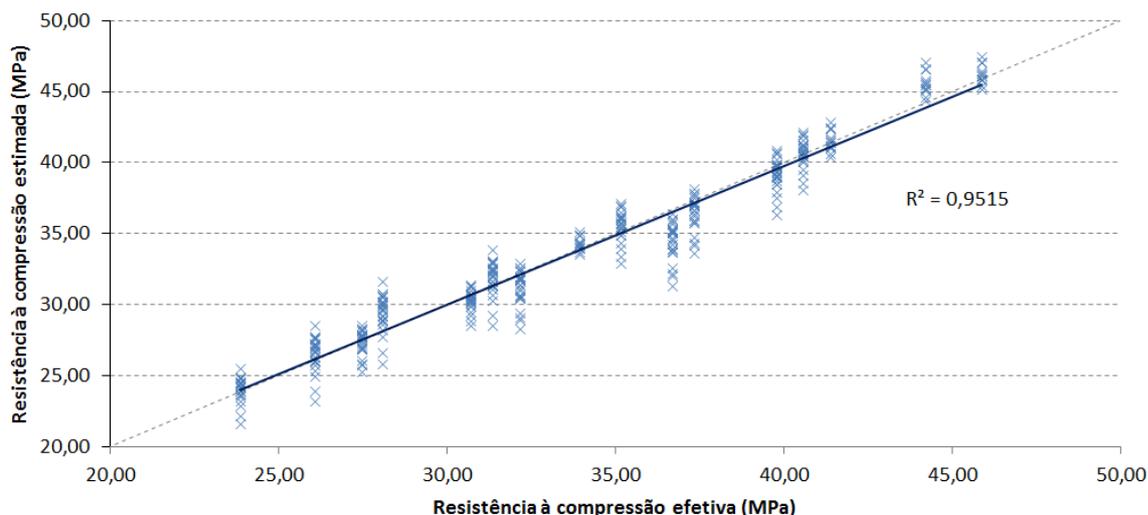


Figura 49 – Correlação entre resistência à compressão efetiva e estimada pelo método (CPV-ARI).

Foi obtido um coeficiente de determinação (R^2) igual a 95,2%, mostrando que é possível determinar a resistência à compressão axial do concreto analisado através do método da resistividade elétrica do concreto no estado fresco, sendo que 95,2% dos resultados podem ser representados pelo modelo da reta ajustada.

4.4.2 CPIV-32

Na sequência são apresentados os resultados das estimativas de resistência à compressão para o concreto com cimento CPIV-32. A Figura 50 apresenta um diagrama com a combinação das Figuras 24 e 38 onde é apresentada a correlação entre resistividade elétrica, relação água/cimento e resistência à compressão.

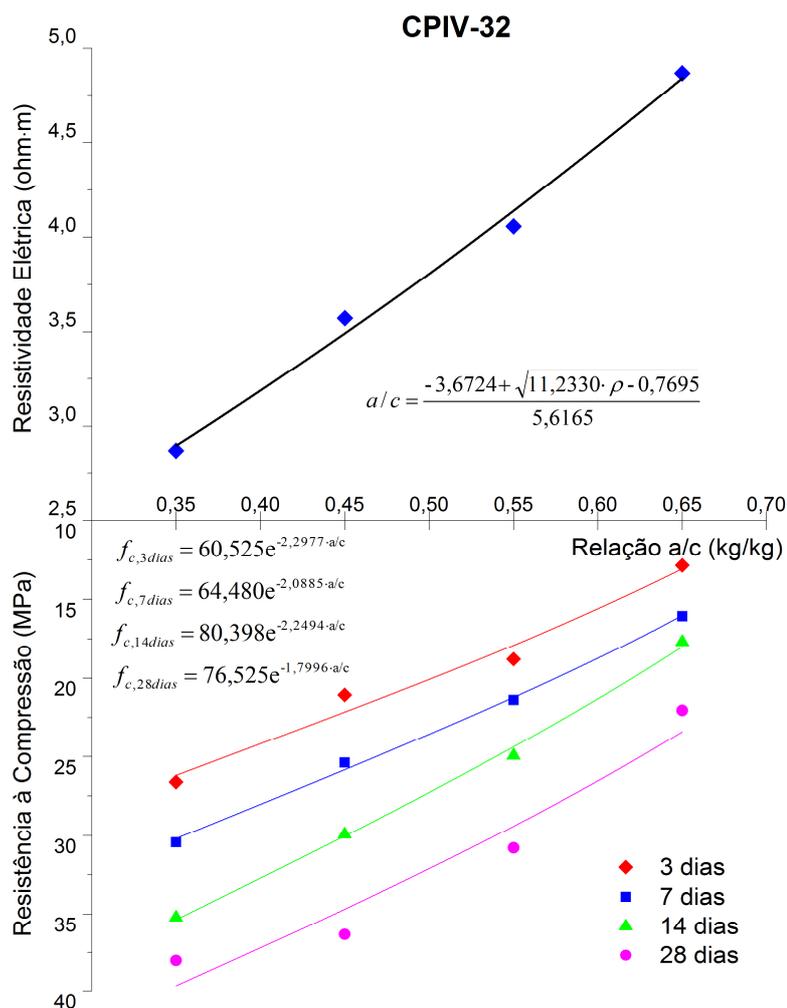


Figura 50 – Diagrama de correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão (CPIV-32).

A Tabela 71 apresenta os valores das estimativas de resistência à compressão, obtidos a partir da utilização das estimativas de relação água/cimento, sendo inseridos nas equações de ajuste da Figura 50, para as idades variadas. Os resultados de resistência à compressão estimada são valores médios, obtidos a partir de todas as estimativas realizadas.

Tabela 71 – Comparação entre a resistência à compressão efetiva e a estimada a partir do método (CPIV-32).

Idade (dias)	Relação a/c	Resistência efetiva (MPa)	Resistência estimada (MPa), 95% confiança	Desvio Padrão (MPa)	C. V. (%)	Erro med. (%)	Erro max. (%)	Erro min. (%)
3	0,35	26,62	27,4 ± 1,64	0,822	3,00	3,35	7,28	0,12
	0,45	21,08	20,91 ± 1,61	0,806	3,85	3,31	8,30	0,68
	0,55	18,78	17,61 ± 1,6	0,798	4,53	6,62	14,47	0,48
	0,65	12,86	13,51 ± 1,7	0,848	6,28	5,95	22,64	0,20
7	0,35	30,43	31,37 ± 1,71	0,855	2,73	3,28	7,05	0,07
	0,45	25,38	24,54 ± 1,72	0,860	3,51	3,65	9,97	0,12
	0,55	21,39	20,99 ± 1,73	0,864	4,12	3,54	9,71	0,01
	0,65	16,06	16,5 ± 1,88	0,939	5,69	4,61	18,25	0,11
14	0,35	35,22	37,01 ± 2,17	1,087	2,94	5,08	9,42	0,54
	0,45	29,92	28,4 ± 2,14	1,072	3,77	5,10	12,11	0,29
	0,55	24,95	24,01 ± 2,13	1,065	4,44	4,73	12,04	0,02
	0,65	17,68	18,52 ± 2,28	1,138	6,14	5,71	21,90	0,03
28	0,35	38,03	41,13 ± 1,93	0,967	2,35	8,16	11,73	4,41
	0,45	36,32	33,28 ± 2,01	1,006	3,02	8,37	13,83	4,23
	0,55	30,78	29,09 ± 2,06	1,032	3,55	5,66	12,02	0,19
	0,65	22,06	23,64 ± 2,31	1,156	4,89	7,16	20,99	0,59

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 71, pode-se perceber que o método da resistividade elétrica forneceu estimativas próximas aos valores de resistência à compressão axial, obtidos experimentalmente. Os erros efetivos médios encontrados ficaram no intervalo de 3,28% a 8,37%, o que evidencia a qualidade do ensaio para realização destas estimativas. Assim como para as estimativas de relação água/cimento, as estimativas de resistência à compressão apresentaram maior erro quando utilizados maiores valores de relação água/cimento, uma vez que estas estimativas dependem do valor de relação água/cimento atribuído à medição.

É apresentada, na Figura 51, a correlação dos valores de resistência à compressão axial, obtidos experimentalmente, *versus* os valores previstos pelo método, para todas as idades e todas as relações a/c analisadas, em função das equações de correlação apresentadas na Figura 50, para os concretos com cimento CPIV-32.

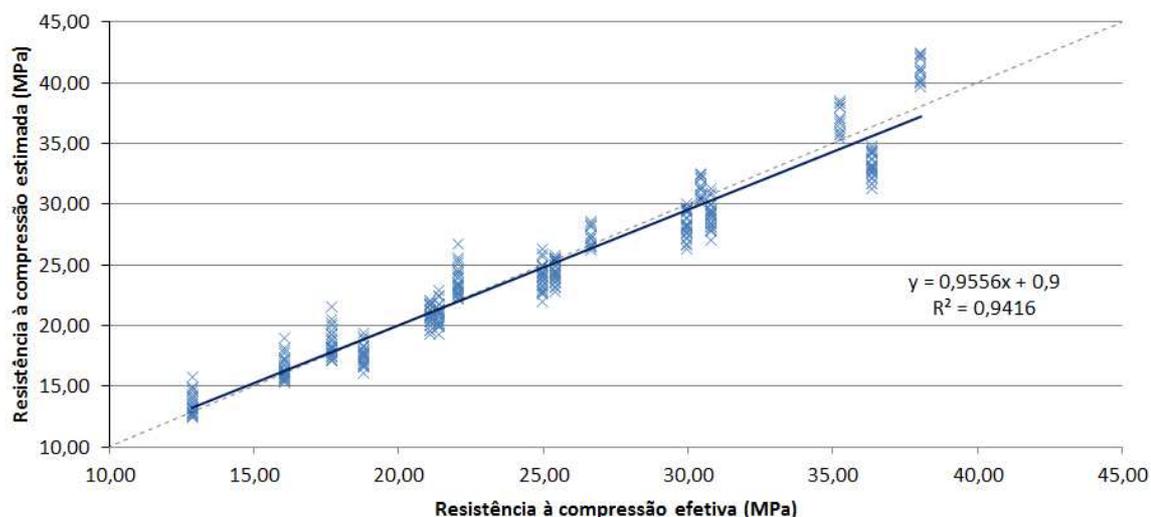


Figura 51 – Correlação entre resistência à compressão efetiva e estimada pelo método (CPIV-32).

Foi obtido um coeficiente de determinação (R^2) igual a 94,2%, mostrando que é possível determinar a resistência à compressão axial do concreto analisado através do método da resistividade elétrica do concreto no estado fresco, sendo que 94,2% dos resultados podem ser representados pelo modelo da reta ajustada.

4.4.3 CPIII-40

Os resultados das estimativas de resistência à compressão para o concreto com cimento CPIII-40 são apresentados na sequência. O gráfico da Figura 52 apresenta um diagrama com a combinação das Figuras 26 e 40, onde é apresentada a correlação entre resistividade elétrica, relação água/cimento e resistência à compressão.

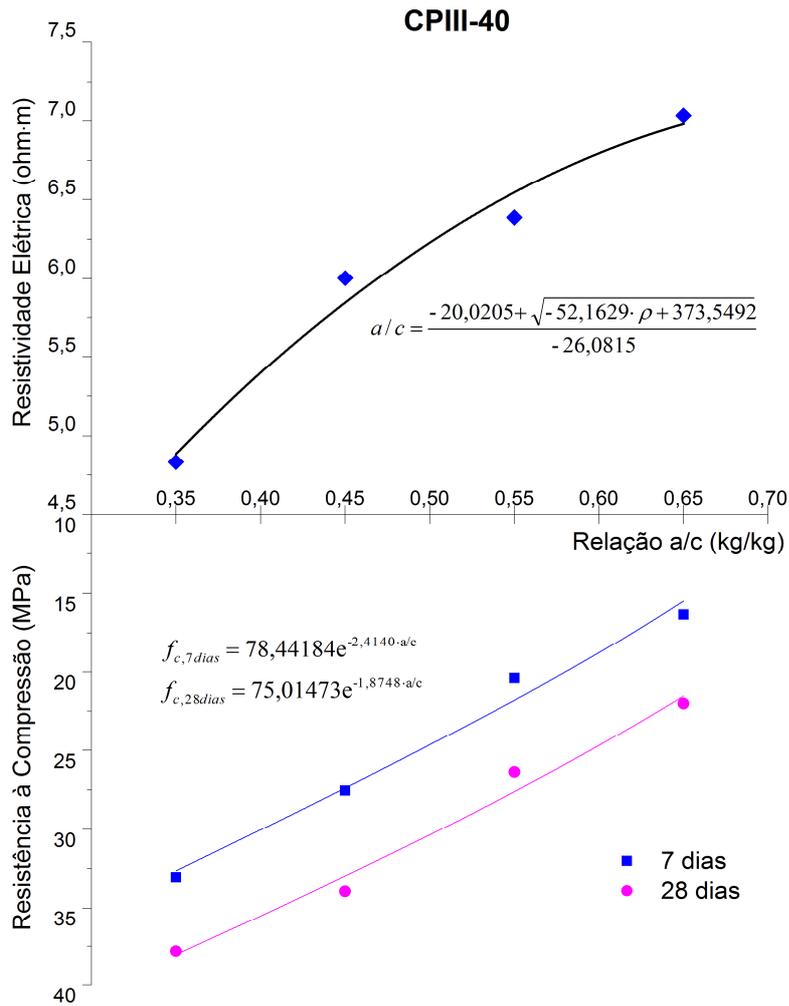


Figura 52 – Diagrama de correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão (CPIII-40).

A Tabela 72 apresenta os valores das estimativas de resistência à compressão, obtidos a partir da utilização das estimativas de relação água/cimento, sendo inseridos nas equações de ajuste da Figura 52, para as idades variadas. Foi utilizada apenas a curva de ajuste polinomial para realização das estimativas, tendo sido descartados os valores fora do intervalo de abrangência da equação, como descrito em 4.2.3. Os resultados de resistência à compressão estimada são valores médios.

Tabela 72 – Comparação entre a resistência à compressão efetiva e a estimada a partir do método (CPIII-40).

Idade (dias)	Relação a/c	Resistência efetiva (MPa)	Resistência estimada (MPa), 95% confiança	Desvio Padrão (MPa)	C. V. (%)	Erro med. (%)	Erro max. (%)	Erro min. (%)
7	0,35	33,04	34,09 ± 2,89	1,446	4,24	4,49	10,12	0,44
	0,45	27,54	25,22 ± 3,75	1,873	7,43	8,60	25,04	1,00
	0,55	20,38	22,1 ± 3,3	1,649	7,46	10,39	21,85	1,45
	0,65	16,34	16,58 ± 3,89	1,947	11,74	9,63	23,54	0,38
28	0,35	37,82	39,27 ± 2,59	1,295	3,30	4,23	9,24	0,37
	0,45	33,93	31,06 ± 3,61	1,804	5,81	8,46	21,61	0,21
	0,55	26,37	28,04 ± 3,27	1,635	5,83	7,89	16,45	1,25
	0,65	22,02	22,41 ± 4,09	2,046	9,13	7,63	18,71	0,28

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 72, pode-se perceber que o método da resistividade elétrica forneceu estimativas próximas aos valores de resistência à compressão axial, obtidos experimentalmente. Os erros efetivos médios encontrados ficaram no intervalo de 4,23% a 10,39%, o que mostra a qualidade do ensaio para realização destas estimativas. Assim como para as estimativas de relação água/cimento, as estimativas de resistência à compressão apresentaram maior erro quando utilizados maiores valores de relação água/cimento, uma vez que estas estimativas dependem do valor de relação água/cimento atribuído à medição.

É apresentado, na Figura 53, o gráfico de correlação dos valores de resistência à compressão axial, obtidos experimentalmente, *versus* os valores previstos pelo método, em função das equações de correlação apresentadas na Figura 52, para os concretos com cimento CPIII-40.

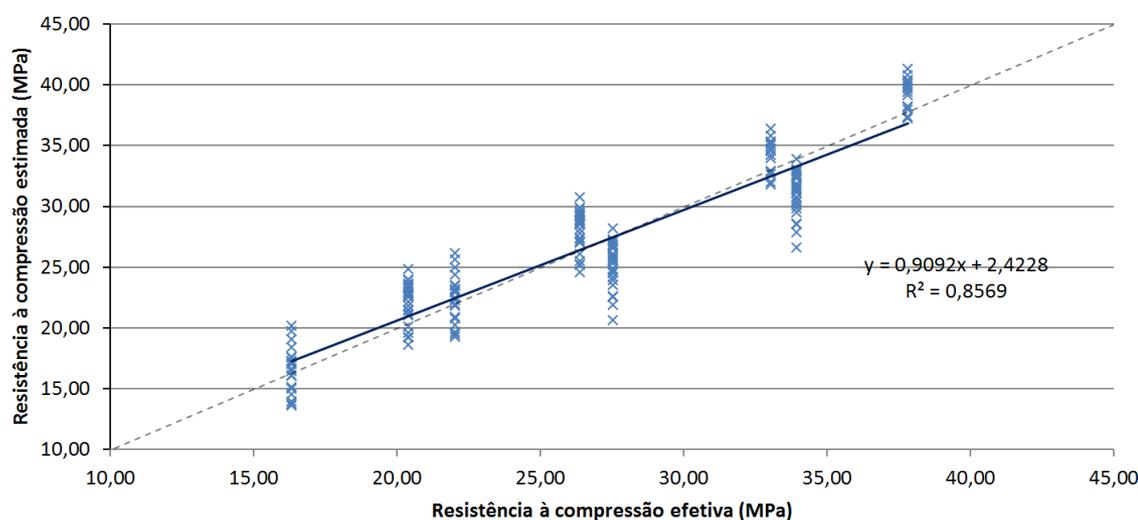


Figura 53 – Correlação entre resistência à compressão efetiva e estimada pelo método (CPIII-40).

Foi obtido um coeficiente de determinação (R^2) igual a 85,7%, mostrando que é possível determinar a resistência à compressão axial do concreto analisado através do método da resistividade elétrica do concreto no estado fresco, sendo que 85,7% dos resultados podem ser representados pelo modelo da reta ajustada.

4.4.4 CII-Z-32

Os resultados das estimativas de resistência à compressão para o concreto com cimento CII-Z-32 são apresentados a seguir. A Figura 54 apresenta um diagrama com a combinação das Figuras 29 e 42, onde é apresentada a correlação entre resistividade elétrica, relação água/cimento e resistência à compressão.

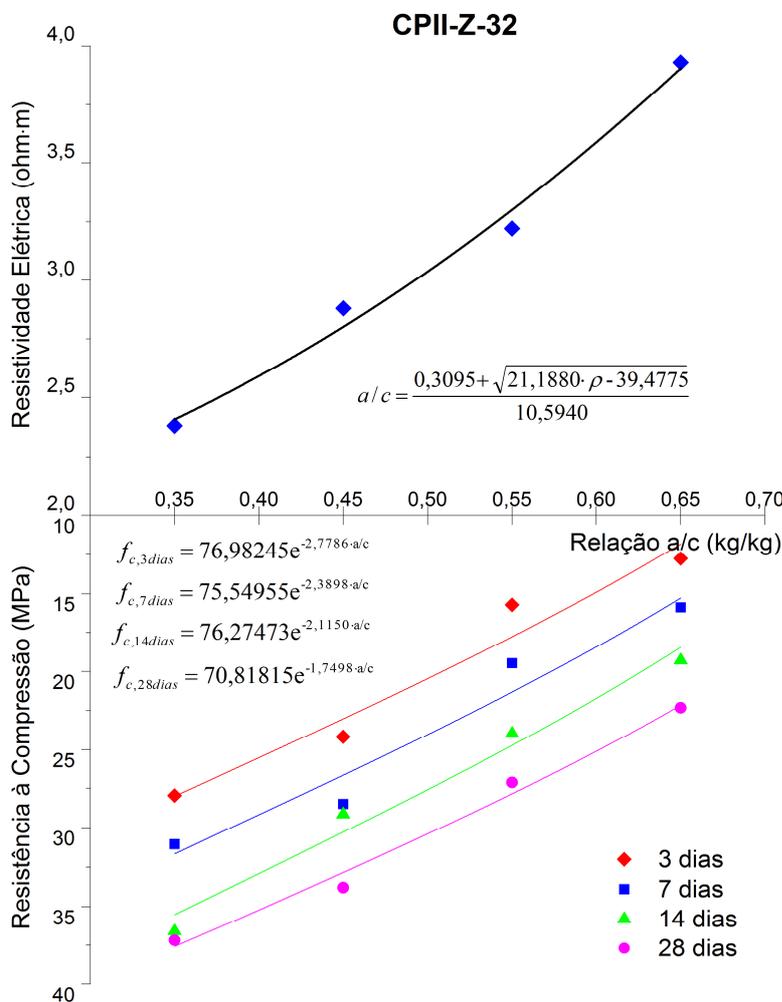


Figura 54 – Diagrama de correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão (CII-Z-32).

A Tabela 73 apresenta os valores das estimativas de resistência à compressão, obtidos a partir da utilização das estimativas de relação água/cimento, sendo inseridos nas

equações de ajuste da Figura 54, para as idades variadas. Os resultados de resistência à compressão estimada são valores médios, obtidos a partir de todas as estimativas realizadas.

Tabela 73 – Comparação entre a resistência à compressão efetiva e a estimada a partir do método (CPII-Z-32).

Idade (dias)	Relação a/c	Resistência efetiva (MPa)	Resistência estimada (MPa), 95% confiança	Desvio Padrão (MPa)	C. V. (%)	Erro med. (%)	Erro max. (%)	Erro min. (%)
3	0,35	27,93	29,91 ± 4,44	2,221	7,42	8,02	24,49	0,16
	0,45	24,17	21,04 ± 1,63	0,814	3,87	12,94	20,63	4,88
	0,55	15,73	17,41 ± 1,35	0,673	3,87	10,66	21,06	2,56
	0,65	12,77	12,54 ± 1,55	0,774	6,17	5,29	12,89	1,39
7	0,35	31,05	33,49 ± 4,27	2,134	6,37	8,43	22,82	1,60
	0,45	28,48	24,76 ± 1,65	0,823	3,33	13,08	19,72	6,20
	0,55	19,47	21,03 ± 1,4	0,699	3,33	8,04	16,73	1,21
	0,65	15,90	15,87 ± 1,68	0,840	5,30	4,10	11,67	0,14
14	0,35	36,57	37,12 ± 4,18	2,090	5,63	4,29	13,91	0,03
	0,45	29,14	28,41 ± 1,67	0,836	2,94	3,11	9,11	0,08
	0,55	23,97	24,59 ± 1,45	0,724	2,94	3,19	9,87	0,11
	0,65	19,28	19,16 ± 1,79	0,897	4,68	3,78	9,77	0,32
28	0,35	37,17	39,02 ± 3,63	1,814	4,65	5,51	15,52	0,54
	0,45	33,79	31,28 ± 1,52	0,761	2,43	7,43	12,65	2,11
	0,55	27,10	27,76 ± 1,35	0,676	2,43	2,84	8,42	0,01
	0,65	22,32	22,58 ± 1,75	0,873	3,87	2,98	9,85	0,17

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 73, pode-se perceber que o método da resistividade elétrica forneceu estimativas próximas aos valores de resistência à compressão axial, obtidos experimentalmente. Os erros efetivos médios encontrados ficaram no intervalo de 2,84% a 13,08%, o que evidencia a qualidade do ensaio para realização destas estimativas. Assim como para as estimativas de relação água/cimento, as estimativas de resistência à compressão apresentaram maior erro quando utilizados maiores valores de relação água/cimento, uma vez que estas estimativas dependem do valor de relação água/cimento atribuído à medição. O erro máximo individual obtido para a idade de 28 dias foi de 15,52%, mostrando que, na pior das situações, a resistência efetiva encontra-se num intervalo de ±15,52% a partir da estimativa realizada com o concreto no estado fresco, para a idade de 28 dias.

É apresentado, na Figura 55, o gráfico de correlação dos valores de resistência à compressão axial, obtidos experimentalmente, *versus* os valores previstos pelo método, em função das equações de correlação apresentadas na Figura 54, para os concretos com cimento CPII-Z-32.

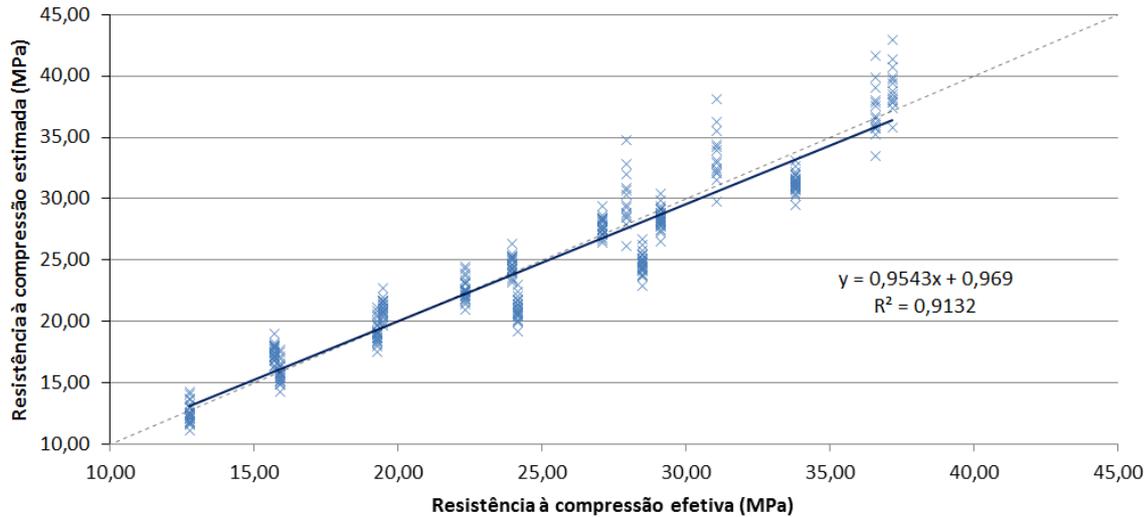


Figura 55 – Correlação entre resistência à compressão efetiva e estimada pelo método (CPII-Z-32).

Foi obtido um coeficiente de determinação (R^2) igual a 91,3%, mostrando que é possível determinar a resistência à compressão axial do concreto analisado através do método da resistividade elétrica do concreto no estado fresco, sendo que 91,3% dos resultados podem ser representados pelo modelo da reta ajustada.

4.4.5 CPII-F-32

A seguir são apresentados os resultados das estimativas de resistência à compressão para o concreto com cimento CPII-F-32. O gráfico da Figura 56 apresenta um diagrama com a combinação das Figuras 31 e 44, onde é apresentada a correlação entre resistividade elétrica, relação água/cimento e resistência à compressão.

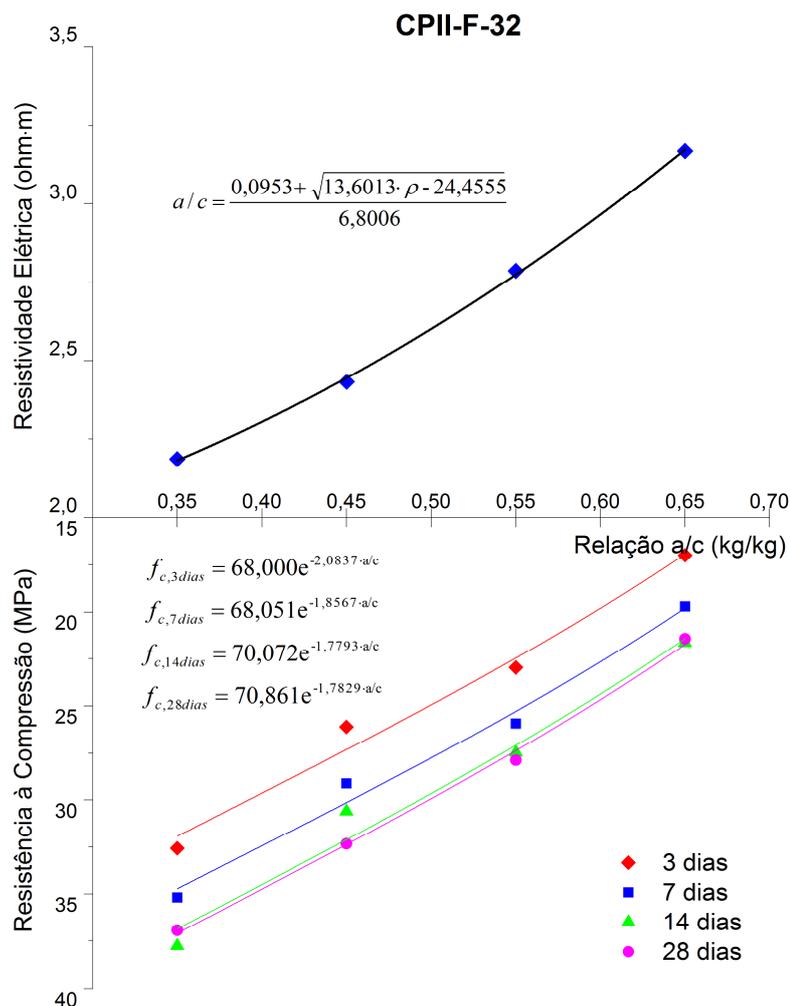


Figura 56 – Diagrama de correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão (CPII-F-32).

A Tabela 74 apresenta os valores das estimativas de resistência à compressão, obtidos a partir da utilização das estimativas de relação água/cimento, sendo inseridos nas equações de ajuste da Figura 56, para as idades variadas. Os resultados de resistência à compressão estimada são valores médios, obtidos a partir de todas as estimativas realizadas.

Tabela 74 – Comparação entre a resistência à compressão efetiva e a estimada a partir do método (CPII-F-32).

Idade (dias)	Relação a/c	Resistência efetiva (MPa)	Resistência estimada (MPa), 95% confiança	Desvio Padrão (MPa)	C. V. (%)	Erro med. (%)	Erro max. (%)	Erro min. (%)
3	0,35	32,58	32,75 ± 3,05	1,524	4,65	4,08	7,16	0,69
	0,45	26,10	26,97 ± 3,42	1,711	6,34	5,89	14,43	0,14
	0,55	22,95	21,49 ± 1,49	0,746	3,47	6,41	13,30	0,46
	0,65	16,98	17,6 ± 1,13	0,563	3,20	4,05	9,60	0,12
7	0,35	35,18	35,49 ± 2,94	1,471	4,15	3,65	6,79	1,02
	0,45	29,12	29,85 ± 3,38	1,689	5,66	5,06	12,24	0,20
	0,55	25,93	24,38 ± 1,51	0,754	3,09	5,99	12,20	0,12
	0,65	19,69	20,41 ± 1,16	0,582	2,85	3,89	8,89	0,19
14	0,35	37,76	37,54 ± 2,98	1,492	3,97	3,51	6,58	0,42
	0,45	30,60	31,8 ± 3,45	1,726	5,43	5,62	13,41	0,30
	0,55	27,48	26,2 ± 1,55	0,776	2,96	4,76	10,71	0,05
	0,65	21,63	22,09 ± 1,21	0,603	2,73	2,82	7,14	0,22
28	0,35	36,93	37,92 ± 3,02	1,510	3,98	3,80	8,46	0,46
	0,45	32,33	32,11 ± 3,49	1,746	5,44	4,37	13,32	0,30
	0,55	27,89	26,44 ± 1,57	0,785	2,97	5,24	11,22	0,60
	0,65	21,41	22,29 ± 1,22	0,610	2,74	4,28	9,19	0,50

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 74, pode-se perceber que o método da resistividade elétrica forneceu estimativas próximas aos valores de resistência à compressão axial, obtidos experimentalmente. Os erros efetivos médios encontrados ficaram no intervalo de 2,82% a 6,41%, o que evidencia a qualidade do ensaio para realização destas estimativas. Assim como para as estimativas de relação água/cimento, as estimativas de resistência à compressão apresentaram maior erro quando utilizados maiores valores de relação água/cimento, uma vez que estas estimativas dependem do valor de relação água/cimento atribuído à medição. O erro máximo individual obtido foi de 14,43%, mostrando que, na pior das situações, a resistência efetiva encontra-se num intervalo de $\pm 14,43\%$ a partir da estimativa realizada com o concreto no estado fresco, para qualquer idade analisada.

É apresentado, na Figura 57, o gráfico de correlação dos valores de resistência à compressão axial, obtidos experimentalmente, *versus* os valores previstos pelo método, em função das equações de correlação apresentadas na Figura 56, para os concretos com cimento CPII-F-32.

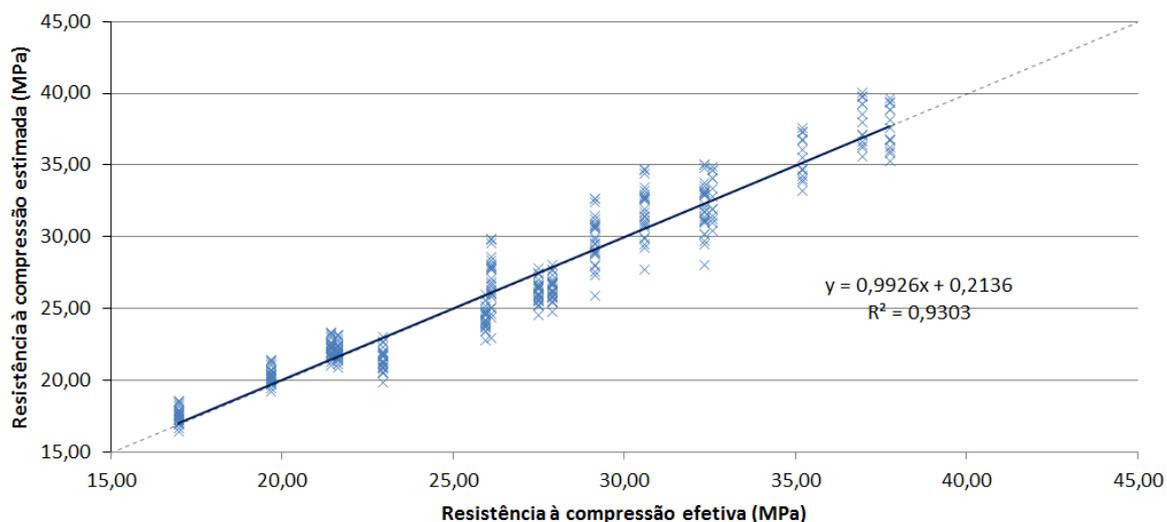


Figura 57 – Correlação entre resistência à compressão efetiva e estimada pelo método (CPII-Z-32).

Foi obtido um coeficiente de determinação (R^2) igual a 93,0%, mostrando que é possível determinar a resistência à compressão axial do concreto analisado através do método da resistividade elétrica do concreto no estado fresco, sendo que 93,0% dos resultados podem ser representados pelo modelo da reta ajustada.

4.4.6 CPII-E-40

Na sequência são apresentados os resultados das estimativas de resistência à compressão para o concreto com cimento CPII-E-40. O gráfico da Figura 58 apresenta um diagrama com a combinação das Figuras 33 e 46, onde é apresentada a correlação entre resistividade elétrica, relação água/cimento e resistência à compressão.

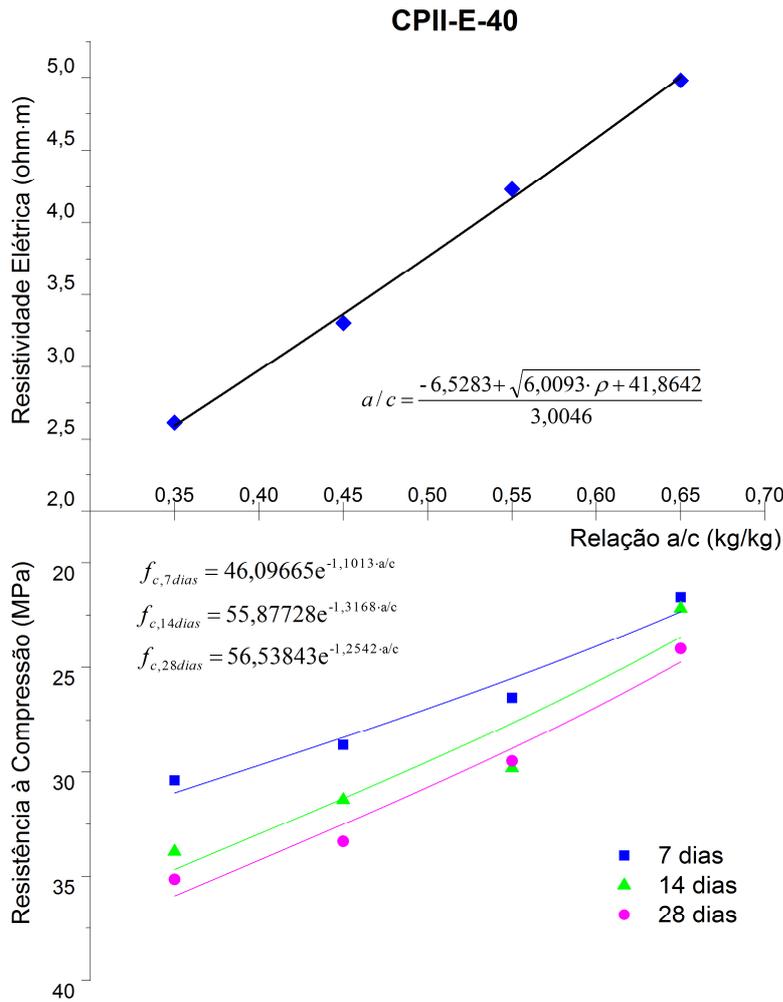


Figura 58 – Diagrama de correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão (CPII-E-40).

A Tabela 75 apresenta os valores das estimativas de resistência à compressão, obtidos a partir da utilização das estimativas de relação água/cimento, sendo inseridos nas equações de ajuste da Figura 58, para as idades variadas. Os resultados de resistência à compressão estimada são valores médios, obtidos a partir de todas as estimativas realizadas.

Tabela 75 – Comparação entre a resistência à compressão efetiva e a estimada a partir do método (CPII-E-40).

Idade (dias)	Relação a/c	Resistência efetiva (MPa)	Resistência estimada (MPa), 95% confiança	Desvio Padrão (MPa)	C. V. (%)	Erro med. (%)	Erro max. (%)	Erro min. (%)
7	0,35	30,40	31,26 ± 0,63	0,316	1,01	2,83	4,26	1,18
	0,45	28,69	28,33 ± 0,55	0,273	0,96	1,31	3,29	0,06
	0,55	26,45	24,94 ± 0,51	0,254	1,02	5,68	7,22	3,65
	0,65	21,64	22,6 ± 0,72	0,359	1,59	4,44	7,38	1,48
14	0,35	33,82	35,12 ± 0,85	0,424	1,21	3,84	5,56	1,84
	0,45	31,33	31,22 ± 0,72	0,360	1,15	0,92	2,80	0,00
	0,55	29,80	26,81 ± 0,65	0,327	1,22	10,03	11,79	7,71
	0,65	22,17	23,82 ± 0,9	0,452	1,90	7,46	11,09	3,83
28	0,35	35,14	36,33 ± 0,84	0,418	1,15	3,37	5,01	1,48
	0,45	33,33	32,48 ± 0,71	0,357	1,10	2,55	4,85	0,50
	0,55	29,45	28,09 ± 0,65	0,326	1,16	4,62	6,39	2,27
	0,65	24,11	25,1 ± 0,91	0,454	1,81	4,12	7,48	0,78

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 75, pode-se perceber que o método da resistividade elétrica forneceu estimativas próximas aos valores de resistência à compressão axial, obtidos experimentalmente. Os erros efetivos médios encontrados ficaram no intervalo de 0,92% a 10,03%, o que evidencia a qualidade do ensaio para realização destas estimativas. Assim como para as estimativas de relação água/cimento, as estimativas de resistência à compressão apresentaram maior erro quando utilizados maiores valores de relação água/cimento, uma vez que estas estimativas dependem do valor de relação água/cimento atribuído à medição. O erro máximo individual obtido para a idade de 28 dias foi de 7,48%, mostrando que, na pior das situações, a resistência efetiva encontra-se num intervalo de $\pm 7,48\%$ a partir da estimativa realizada com o concreto no estado fresco, para a idade de 28 dias.

É apresentado, na Figura 59, o gráfico de correlação dos valores de resistência à compressão axial, obtidos experimentalmente, *versus* os valores previstos pelo método, em função das equações de correlação apresentadas na Figura 58, para os concretos com cimento CPII-E-40.

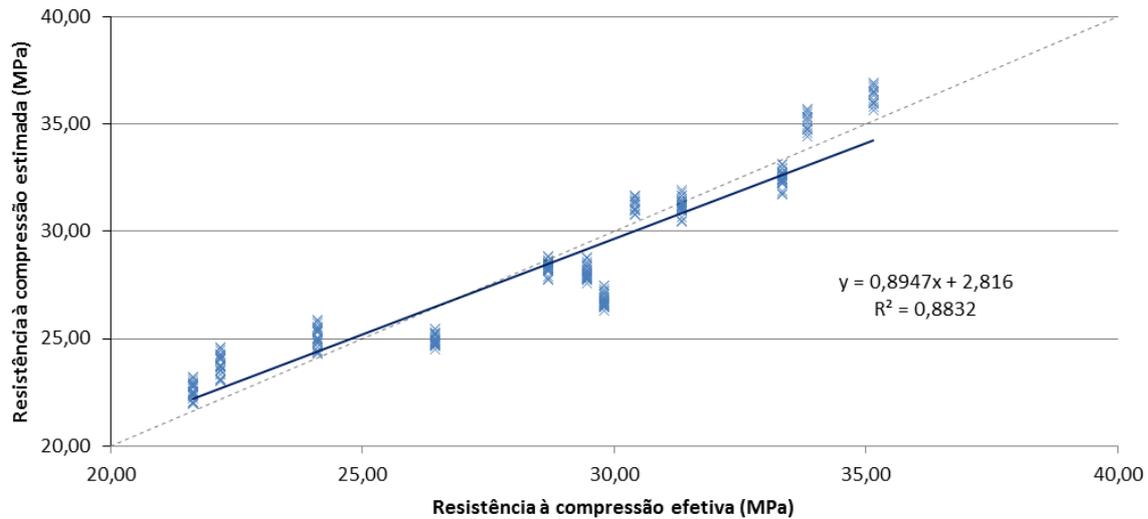


Figura 59 – Correlação entre resistência à compressão efetiva e estimada pelo método (CPII-E-40).

Foi obtido um coeficiente de determinação (R^2) igual a 88,3%, mostrando que é possível determinar a resistência à compressão axial do concreto analisado através do método da resistividade elétrica do concreto no estado fresco, sendo que 88,3% dos resultados podem ser representados pelo modelo da reta ajustada.

5 CONCLUSÃO

A seguir são apresentadas as considerações finais do trabalho, respondendo aos objetivos propostos. Posteriormente, estão apresentadas sugestões para trabalhos futuros, onde são identificados temas para pesquisas futuras.

As conclusões apresentadas se referem apenas aos dados obtidos para os concretos estudados, que foram elaborados utilizando materiais com tipos, quantidades e características específicas, assim como técnicas de execução dos ensaios e equipamentos específicos. A representatividade dos ensaios deve ser confirmada a partir de novas pesquisas, com resultados que venham a complementar e a confirmar os já obtidos.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma nova sonda, baseada no modelo proposto por Mancio et al. (2010), foi adaptada e construída para possibilitar a determinação dos valores de resistividade das amostras de concreto no estado fresco e, a partir destes, as estimativas de relação a/c do concreto fresco e de resistência à compressão, no estado endurecido.

Para realização da calibração da sonda desenvolvida, através da determinação do fator geométrico (k), foram utilizados o método analítico, que obteve como resultado um fator k de 0,319, além do método experimental, que obteve como resultado um fator geométrico k igual a 0,367, apresentando um desvio de 14,93% com relação ao valor calculado. Fica evidente a necessidade de se realizar a calibração através do método experimental, vista a grande diferença com relação ao valor teórico. É válido ressaltar que o fator geométrico da sonda é uma constante dependente apenas da geometria do equipamento, não necessitando de calibrações periódicas. A sua calibração é necessária apenas uma vez, na fase de montagem do equipamento.

Com vistas à **influência da relação água/cimento na resistividade elétrica** do concreto no estado fresco, foi observada uma forte correlação direta entre a relação a/c e a resistividade elétrica do concreto, para os variados cimentos estudados, uma vez que o aumento da relação água/cimento resultou em acréscimos nos valores de resistividade elétrica medidos, enquanto que a diminuição da relação a/c acarretou em menores resultados de resistividade. Os resultados da análise de variância confirmaram a existência desta influência significativa, uma vez que a relação a/c apresentou uma forte influência estatística sobre a resistividade elétrica do concreto no estado fresco, para todas as situações analisadas.

Com relação à **influência do tipo de cimento utilizado nas medições de resistividade elétrica**, é possível perceber que os concretos confeccionados com cimentos contendo maiores teores de adições minerais ativas (como é o caso do CPIII-40) apresentaram maiores resultados de resistividade elétrica. Este comportamento pode ser atribuído à menor concentração de íons presentes no clínquer dissolvidos na mistura, que contribuem para a condutividade da solução saturada. O comportamento inverso foi percebido para os cimentos com menores teores de adições minerais ativas (por exemplo, o CPII-F-32 e o CPV-ARI), que apresentaram menores valores de resistividade elétrica, sendo os resultados obtidos provavelmente ocasionados pela maior concentração de íons, o que favorece a condutividade elétrica da solução analisada. No entanto, é possível perceber que o método da resistividade elétrica forneceu boas estimativas para os variados cimentos utilizados na pesquisa, o que evidencia a aplicabilidade do método para concretos com variadas adições minerais e para variados teores de substituição. É importante ressaltar que diferentes comportamentos foram obtidos para as curvas de correlação com os diferentes cimentos analisados. Para alguns casos, com o aumento da relação a/c, foi obtida uma maior variação nos resultados de resistividade (CPIV-32, CPII-Z-32, CPII-F-32 e CPII-E-40), enquanto que em outros casos existe o comportamento inverso, onde o aumento da relação a/c acarreta em menores variações na resistividade (CPV-ARI e CPIII-40). Este comportamento destaca a importância da obtenção da curva de correlação entre a relação a/c e a resistividade, antes da realização das medições.

Para a **estimativa de valores de relação a/c a partir das medições de resistividade elétrica** no estado fresco, foram obtidos valores médios na ordem de $\pm 0,02$, com relação aos valores efetivos das misturas testadas. A margem de erro média, obtida para o CPV-ARI, ficou no intervalo entre 2,62% e 6,57%; para o CPIV-32, entre 3,32% e 6,53%; para o CPIII-40, entre 5,34% e 9,38%; para o CPII-Z-32, entre 4,78% e 5,78%; para o CPII-F-32, entre 3,46% e 7,16%; e, para o CPII-E-40, entre 2,25% e 3,32%. Em todas as situações foram obtidas relações a/c muito próximas das reais, mostrando que é possível determinar a relação a/c a partir das medições de resistividade elétrica do concreto no estado fresco, para as misturas analisadas.

Com o objetivo de verificar a **influência do tempo na resistividade elétrica** do concreto no estado fresco, foram realizadas análises de variância, considerando-se o tempo como um dos fatores responsáveis sobre a variável resposta (resistividade elétrica). Os testes realizados para os 60 minutos iniciais de ensaio indicaram, para a maior parte dos cimentos

(CPV-ARI, CPIII-40, CPII-F-32 e CPII-E-32), que não existe influência estatística significativa do tempo sobre as medições de resistividade elétrica, com 99% de confiança, antes do início do tempo de pega. Já para os cimentos CPIV-32 e CPII-Z-32, foram obtidos valores de F pouco superiores ao valor de F_{crit} , o que indica uma fraca influência estatística do tempo sobre a resistividade elétrica. No entanto, neste caso, não foi possível perceber uma tendência similar entre as amostras do mesmo cimento, uma vez que as variações ocorreram em situações isoladas (para uma relação a/c). Já os resultados obtidos através da comparação geral das amostras, indicam que existe uma fraca influência estatística sobre as medições de resistividade, uma vez que o valor de F obtido é pouco superior ao F crítico, tanto para 60, quanto para 120 minutos de ensaio. No entanto, com relação aos resultados da análise de 120 minutos, foi obtido um valor F superior ao obtido para a análise de 60 minutos, o que indica que, com o aumento da duração do ensaio, o tempo exerce maior influência estatística sobre os resultados de resistividade.

Para os resultados de resistência à compressão dos concretos, foram obtidos valores maiores com a evolução das idades das amostras, assim como para menores valores de relação a/c, sendo estes comportamentos já esperados.

Através da **aplicação do método da resistividade elétrica à estimativa da resistência à compressão do concreto**, foi possível obter modelos ajustados aos resultados de resistência à compressão dos concretos, confeccionados com os cimentos utilizados na pesquisa. Foram obtidos valores de R^2 no intervalo de 85,9% a 95,15%, relacionando-se os valores de resistência à compressão do concreto, obtidos experimentalmente, com as estimativas de resistência obtidas pelo método. A estimativa de valores de resistência à compressão, a partir das medições de resistividade elétrica no estado fresco, forneceu valores com uma margem de erro média de 1,26% a 6,13%, para o CPV-ARI; de 3,28% a 8,37%, para o CPIV-32; de 5,11% a 10,32%, para o CPIII-40; de 2,84% a 13,08%, para o CPII-Z-32; de 2,82% a 6,41%, para o CPII-F-32; e, de 0,92% a 10,03%, para o CPII-E-40, mostrando que é possível determinar a resistência à compressão do concreto a partir das medições de resistividade elétrica do concreto no estado fresco, para as misturas analisadas.

A aplicação do método no canteiro de obras exige uma calibração prévia do equipamento, onde são elaboradas as correlações entre a relação a/c e a resistividade elétrica do concreto no estado fresco, baseadas nos materiais específicos utilizados na confecção do concreto. Este procedimento é similar a outros métodos bastante usuais, como é o caso da determinação da correlação entre a relação a/c e a resistência à compressão do concreto, ou o

método da maturidade, que permite a estimativa de valores de resistência do concreto a partir do seu histórico de temperaturas, baseada em calibrações realizadas previamente.

O método da resistividade elétrica se revela como uma interessante alternativa na determinação da resistência à compressão do concreto, ainda no estado fresco, para as idades desejadas. A partir das curvas de elaboração das curvas de correlação (curvas de calibração) é possível realizar a estimativa de outras propriedades mecânicas do concreto desejadas, como, por exemplo, a resistência à tração ou o módulo de elasticidade, bastando realizar os ensaios de calibração.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto as possibilidades fornecidas pela aplicação do método da resistividade à determinação instantânea dos valores de relação a/c e de resistência à compressão, são apresentadas algumas sugestões para dar continuidade ao estudo:

- a) elaborar um dispositivo prático e portátil acoplado à sonda que permita a determinação, *in-loco*, da resistividade elétrica do concreto;
- b) verificar a influência de diferentes teores de adições minerais e químicas ao concreto, nos resultados de resistividade elétrica;
- c) verificar a influência da temperatura nos resultados de resistividade elétrica;
- d) avaliar a eficiência do método da resistividade elétrica na estimativa de outras propriedades mecânicas do concreto, como a resistência à tração e o módulo de elasticidade;
- e) realizar ensaios em campo com o método analisado, com a finalidade de comparar com os resultados obtidos em laboratório;
- f) avaliar a influência do teor de argamassa nos valores de resistividade elétrica do concreto.

REFERÊNCIAS

ABRAMS, D. A. **Design of concrete mixtures**. Chicago, IL: Lewis Institute, 1918. (Bulletin. Structural materials research laboratory, n. 1).

ALI, N. T. et al. Reflectometer apparatus for rapid determination of water-cement ratio. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, CIRCUITS, AND SYSTEMS (ICECS), 17., 2010, Athens. **Anais ...** 2010. p. 1061-1063.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). ASTM C 150-2007: Standard specification for Portland cement. In: _____. **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia: American Society for Testing Materials, 2007. v. 04.01.

ARCHIE, G. E. The Electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. **AIME Transactions**, [S.l.], v. 146, p. 54-62, 1942.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9479**: argamassa e concreto: câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 7215**: cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 5735**: cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5736**: cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **NBR NM 67**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 33**: concreto - amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 15823-2**: concreto auto adensável: parte 2: determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 8953**: concreto para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5738**: concreto: procedimentos para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 7212**: execução de concreto dosado em central. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. S. O cimento Portland no Brasil. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. São Paulo, SP: IBRACON, 2010. v. 1, cap. 24, p. 761-789.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Concreto**: ciência e tecnologia. São Paulo, SP: IBRACON, 2011. v. 1, cap. 06, p. 185-231.

BESCHER, E. et al. Determination of water-to-cement ratio in freshly mixed rapid-setting calcium sulfoaluminate concrete using 2.45 GHz microwave radiation. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 34, n. 5, p. 807-812, May 2004.

BOIS, K. J. et al. Cure-state monitoring and water-to-cement ratio determination of fresh portland cement-based materials using near-field microwave techniques. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [S.l.], v. 47, n. 3, p. 628-637, 1998.

BOIS, K. J.; BENALLY, A. D.; ZOUGHI, R. Microwave near-field reflection property analysis of concrete for material content determination. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [S.l.], v. 49, n. 1, p. 49-55, 2000.

BUENFELD, N. R.; NEWMAN, J. B. Examination of three methods for studying ion diffusion in cement pastes, mortars and concrete. **Materials and Structures**, [S.l.], n. 20. p. 3-10, 1987.

BRITISH STANDARD (BSI). **BS EN 197-1**: cement: Part 1: composition, specifications and conformity criteria for common cements. London: British Standards Institution, Nov. 2011.

CARVALHO, A. G. **Energia de ativação dos concretos**: experimentação e modelagem. 2002. 134 f. Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2002.

DOWELL, A; CRAMER, S. Field measurement of water cement ratio for PCC- Phase 2. **Report**, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin, n. 0092-45-16 (WHRP 02-02), Madison, WI, 2002.

FATELEY, W. G.; CAFFIN, N. Development of a field-portable near-infrared water-cement ratio meter, phase I: investigation of spectral feasibility. **Final Report**, Kansas Department of Transportation Materials Research Center, Topeka, KS, 1999.

FLÔRES, E. O. **Equipamento para estimativa da força de compressão do concreto através da medição da resistividade**. 2014. 71 f. Monografia (Graduação) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2014.

FOX, M.; TROST, S.; HELLMAN, S. Evaluation of novel methods to measure water-to-cement ratio of fresh concrete. **Final Report for Highway IDEA Project 105**, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 2007.

GASPARI, M. M. **Determinação instantânea da relação água/cimento através do método da resistividade elétrica em concretos no estado fresco**. 2013. 65 f. Monografia (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2013.

HAMMAD, A. H. **Evaluation of soil-cement properties with electrical resistivity**. Halifax, 2013. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas) -- Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, 2013.

HELENE, P; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. São Paulo, SP: IBRACON, 2010. v. 2, p. 945-983.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1993.

HIGHWAY INNOVATIVE TECHNOLOGY EVALUATION CENTER (HITEC). Evaluation of the troxler model 4430 water-cement gauge: technology evaluation report. Washington, D.C: HITEC, 1996.

ISAIA, G. C. A água no concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo, SP: IBRACON, 2011. v. 1, cap. 09, p. 311 – 345.

_____. A evolução do concreto estrutural. In: ISAIA, G. C. (Ed). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo, SP: IBRACON, 2011. v. 1, cap. 01, p. 001-055.

JAKOBSEN, U. H.; LAUGESSEN, P.; THAULOW, N. Determination of water-cement ratio in harden concrete by optical fluorescence microscopy [J]. **ACI SP-191**, Farmington Hills, MI, p. 27–42, 2000.

KOELIKER, J.; HOSSAIN, M.; IBRAHIM, H. Development of a water-cement ratio meter. **Final Report**, Kansas State University, Kansas Department of Transportation, n. KSU-265, Topeka, KS, Sept. 1994.

LAWRENCE, D. J. **Getting quality assurance right now**. Boston, MA: Aberdeen Group: 1984. Disponível em: <http://www.concreteconstruction.net/Images/Getting%20Quality%20Assurance%20Right%20Now_tcm45-341038.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2014.

LI, Z.; LI, W. **Contactless, transformer-based measurement of the resistivity of materials**. Patent US6639401 B2, Oct. 28, 2003.

LYSE, I. "Tests on consistency and strength of concrete having constant water content". **Proceedings of American Society for Testing Materials**, Philadelphia, PA, v. 32, pt. 2, p. 629-636, Dec. 1932.

MACDONALD, K. A.; NORTHWOOD, D. O. Rapid estimation of water-cementitious ratio and chloride ion diffusivity in hardened and plastic concrete by resistivity measurement. **ACI Structural Journal**, Farmington Hills, MI, v. 191, p. 57-67, 2000.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 2004.

MANCIO, M. et al. Instantaneous in-situ determination of water-cement ratio of fresh concrete. **ACI Materials Journal**, [S.l.], v. 107, n. 6, p. 587-583. Nov./Dec. 2010.

MANCIO, M.; ZHANG, J.; MONTEIRO, P. J. M. Nondestructive surface measurement of corrosion of reinforcing steel in concrete. **Canadian Civil Engineer**, [S.l.], v. 21, n. 2, p. 12-14, May 2004.

MANCHIRYAL, R. K.; NEITHALATH, N. Analysis of the influence of material parameters on electrical conductivity of cement pastes and concretes. *Magazine of Concrete Research*, London, GB, v. 61, n. 4, p. 257-270, May 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 4. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MONTEIRO, P. J. M.; HELENE, P. L. R. Designing concrete mixtures for desired mechanical properties and durability, *ACI Structural Journal*, Farmington Hills, MI, v. 144, p. 519-543, 1994.

MORRISON, H. F. **The Berkeley course in applied geophysics**. University of California, Berkeley, Berkeley, CA, 2004. Disponível em <<http://appliedgeophysics.lbl.gov>>. Acesso em: 23 jan. 2014.

NÄGELE, E.; HILSDORF, H.K. A new method for cement content determination of fresh concrete. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 10, n. 1, p. 23-34, Jan. 1980.

NAGI, M.; WHITING, D. Determination of water content of fresh concrete using a microwave oven. **Concrete and Aggregates**, [S.l.], v. 16, n. 2, p. 125-131, Dec. 1994.

NAIK T R, RAMME B W. Determination of the water-cement ratio of concrete by the buoyancy principle [J]. **ACI Mater J**, Farmington Hills, MI, n. 86, p. 3-9, 1989.

NANTUNG, T. E. Determination of water-to-cement ratio in fresh concrete using microwave oven. SHRP product evaluation. **Interim Report**, Indiana Department of Transportation, Wets Lafayette, IN, 1998.

NEVILLE, A. M. How useful is the water-cement ratio? **Concrete International**, [S.l.], v. 21, n. 9, p. 69-70. Set. 1999.

NEVILLE, A. M. How closely can we determine the water-cement ratio of hardened concrete? **Materials and Structures**, [S.l.], v. 36, p. 311-318, Set. 2003.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo, PINI, 1997.

PEREIRA, J. P. V. V. **Avaliação da resistência à compressão do betão através de ensaios não-destrutivos**. Coimbra, 1999. 226 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Universidade de Coimbra, Coimbra, 1999.

PEREIRA, V. C. O. **Estudo da influência do tipo de cimento em relação à corrosão de armaduras sob ação de íons cloretos**. Recife, PE, 2011. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Recife, 2011.

PHILIPPIDIS, T.P.; AGGELIS, D.G. An acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 33, n. 4, p. 525-538, Apr. 2003.

POPOVICS, S.; POPOVICS, J. S. Ultrasonic testing to determine water-cement ratio for freshly mixed concrete. **Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP**, [S.l.], v. 20, n. 2, p. 262-268, Dec. 1998.

ROMANO, R. C. O.; CARDOSO, F. A.; PILLEGGI, R. G. Propriedades do concreto no estado fresco. In: ISAIA, G. C. (Ed). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo, SP: IBRACON, 2011. v. 1, cap. 13, p. 453-499.

SAHU, S. et al. Determination of water–cement ratio of hardened concrete by scanning electron microscopy. **Cement and Concrete Composites**, [S.l.], v. 26, n. 8, p. 987-992, Nov. 2004.

SARTORIUS. **Manual of Weighing Applications** – Part 1 Density. 1999.

SILVA, M. G. Cimentos Portland com adições minerais. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. São Paulo, SP: IBRACON, 2010. v. 1, cap. 25, p. 791-823.

TASHIRO, C.; ISHIDA, H.; SHIMAMURA, S. Dependence of the electrical resistivity on evaporable water content in hardened cement pastes. **Journal of Materials Science Letters**, [S.l.], v. 6, p. 1379-1381, 1987.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2nd ed. Londres: Imprensa Acadêmica, 1997.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. R. L. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo, SP: IBRACON, 2011. v. 1, cap. 12, p. 415-451.

WEI, X. **Interpretation of hydration process of cement-based materials using resistivity measurement**. 2004. 186 f. Tese (Doutorado) -- Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, 2004.

WEI, X.; LI, Z.. Early hydration process of Portland cement paste by electrical measurement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S.l.], v. 18, n. 1, feb. 2006.

WEI, X.; XIAO, L.; LIAO, Y. Early age properties of cementitious materials by electrical resistivity measurement. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater**, [S.l.], v. 25, n. 4, Aug. 2010.

WERKEMA, M. C. C.; DRUMOND, F. B.; AGUIAR, S. **Análise de variância: comparação de várias situações**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996.

WONG, H. S.; BUENFELD, N. R, Determining the water–cement ratio, cement content, water content and degree of hydration of hardened cement paste: method development and validation on paste samples. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 39, p. 957-965, 2009.

XIAO, L.; LI, Z. Early-age hydration of fresh concrete monitored by non-contact electrical resistivity measurement. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 38, 2008. p. 312–319.

ZUO, Y.; WEI, X. Portland cement hydration by electrical resistivity method and computer simulation. **Journal of Testing and Evaluation**, [S.l.], v. 41, n. 3, p. 1-7, 2013.

ZUO, Y.; ZI, J.; WEI, X. Hydration of cement with retarder characterized via electrical resistivity measurements and computer simulation. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 53, p. 411-418, 2014.

APÊNDICE A – MEDICÕES INDIVIDUAIS

Tabela A1 – Resistividade elétrica ao longo do tempo para diferentes relações a/c - amostra 1 (CPV-ARI).

Amostra 1, CPV-ARI												
Relação a/c	0,35			0,45			0,55			0,65		
Tempo (min)	Vo (V)	V (V)	ρ ($\Omega.m$)	Vo (V)	V (V)	ρ ($\Omega.m$)	Vo (V)	V (V)	ρ ($\Omega.m$)	Vo (V)	V (V)	ρ ($\Omega.m$)
0	0,6085	0,0256	2,29	0,6033	0,0322	2,91	0,5849	0,0341	3,18	0,5209	0,0339	3,55
	0,6292	0,0265	2,30	0,6143	0,0316	2,80	0,5921	0,0330	3,04	0,5472	0,0370	3,69
	0,6290	0,0263	2,28	0,6156	0,0300	2,66	0,6048	0,0342	3,08	0,5463	0,0365	3,64
10	0,6412	0,0270	2,30	0,6082	0,0301	2,70	0,5907	0,0335	3,09	0,5638	0,0371	3,59
	0,6398	0,0261	2,22	0,6143	0,0298	2,64	0,5915	0,0336	3,10	0,5652	0,0355	3,42
	0,6415	0,0259	2,20	0,6136	0,0302	2,68	0,5961	0,0335	3,06	0,5719	0,0372	3,55
20	0,6367	0,0252	2,16	0,6066	0,0322	2,89	0,5807	0,0350	3,29	0,5725	0,0355	3,38
	0,6431	0,0244	2,07	0,6133	0,0313	2,78	0,5908	0,0339	3,13	0,5720	0,0365	3,48
	0,6446	0,0249	2,11	0,6084	0,0302	2,71	0,5922	0,0331	3,05	0,5741	0,0366	3,48
30	0,6389	0,0257	2,19	0,6073	0,0304	2,73	0,5865	0,0339	3,15	0,5672	0,0383	3,68
	0,6444	0,0263	2,23	0,6144	0,0291	2,58	0,5952	0,0347	3,18	0,5721	0,0370	3,53
	0,6424	0,0242	2,05	0,6118	0,0300	2,67	0,5919	0,0344	3,17	0,5754	0,0365	3,46
40	0,6238	0,0244	2,13	0,5999	0,0317	2,88	0,5796	0,0354	3,33	0,5618	0,0373	3,62
	0,6326	0,0252	2,17	0,6087	0,0309	2,77	0,5847	0,0351	3,27	0,5599	0,0356	3,47
	0,6310	0,0251	2,17	0,6121	0,0293	2,61	0,5898	0,0348	3,22	0,5691	0,0360	3,45
50	0,6320	0,0269	2,32	0,6042	0,0304	2,74	0,5816	0,0343	3,22	0,5569	0,0374	3,66
	0,6314	0,0276	2,38	0,6119	0,0305	2,72	0,5850	0,0336	3,13	0,5632	0,0374	3,62
	0,6343	0,0273	2,35	0,6137	0,0316	2,81	0,5971	0,0345	3,15	0,5695	0,0356	3,41
60	0,6151	0,0264	2,34	0,6029	0,0303	2,74	0,5833	0,0347	3,24	0,5649	0,0372	3,59
	0,6377	0,0262	2,24	0,6058	0,0309	2,78	0,5903	0,0347	3,20	0,5645	0,0380	3,67
	0,6347	0,0254	2,18	0,6124	0,0310	2,76	0,5980	0,0330	3,01	0,5680	0,0369	3,54
70	-	-	-	0,6059	0,0322	2,90	0,5797	0,0333	3,13	0,5716	0,0360	3,43
	-	-	-	0,6072	0,0313	2,81	0,5817	0,0353	3,31	0,5685	0,0362	3,47
	-	-	-	0,6154	0,0321	2,84	0,5895	0,0352	3,26	0,5642	0,0376	3,63
80	-	-	-	0,6040	0,0308	2,78	0,5841	0,0360	3,36	0,5638	0,0381	3,68
	-	-	-	0,6133	0,0306	2,72	0,5899	0,0352	3,25	0,5639	0,0383	3,70
	-	-	-	0,6106	0,0307	2,74	0,5894	0,0348	3,22	0,5700	0,0373	3,57
90	-	-	-	0,6042	0,0316	2,85	0,5835	0,0340	3,18	0,5642	0,0388	3,75
	-	-	-	0,6084	0,0319	2,86	0,5837	0,0354	3,31	0,5621	0,0379	3,68
	-	-	-	0,6114	0,0311	2,77	0,5863	0,0360	3,35	0,5666	0,0382	3,68
100	-	-	-	0,6082	0,0314	2,81	0,5837	0,0381	3,56	0,5643	0,0371	3,58
	-	-	-	0,6092	0,0323	2,89	0,5856	0,0349	3,25	0,5703	0,0385	3,68
	-	-	-	0,6079	0,0311	2,79	0,5848	0,0354	3,30	0,5676	0,0383	3,68
110	-	-	-	0,6060	0,0326	2,93	0,5826	0,0367	3,43	0,5593	0,0392	3,82
	-	-	-	0,6091	0,0315	2,82	0,5817	0,0365	3,42	0,5567	0,0395	3,87
	-	-	-	0,6048	0,0304	2,74	0,5839	0,0358	3,34	0,5643	0,0386	3,73
120	-	-	-	0,5992	0,0324	2,95	0,5745	0,0370	3,51	0,5587	0,0377	3,68
	-	-	-	0,5992	0,0324	2,95	0,5816	0,0365	3,42	0,5713	0,0368	3,51
	-	-	-	0,5987	0,0327	2,98	0,5847	0,0372	3,47	0,5709	0,0368	3,51

Tabela A2 – Resistividade elétrica ao longo do tempo para diferentes relações a/c - amostra 2 (CPV-ARI).

Amostra 2, CPV-ARI												
Relação a/c	0,35			0,45			0,55			0,65		
Tempo (min)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)
0	0,6210	0,0255	2,24	0,6074	0,0326	2,93	0,5869	0,0332	3,08	0,5494	0,0385	3,82
	0,6318	0,0264	2,28	0,6095	0,0325	2,91	0,5933	0,0332	3,05	0,5676	0,0370	3,55
	0,6328	0,0255	2,20	0,6150	0,0313	2,77	0,5964	0,0341	3,12	0,5678	0,0355	3,41
10	0,6293	0,0259	2,24	0,6066	0,0313	2,81	0,5932	0,0344	3,16	0,5623	0,0374	3,63
	0,6224	0,0259	2,27	0,6088	0,0292	2,61	0,5877	0,0334	3,10	0,5692	0,0374	3,58
	0,6287	0,0260	2,25	0,6106	0,0306	2,73	0,5892	0,0343	3,17	0,5663	0,0358	3,45
20	0,6294	0,0259	2,24	0,6048	0,0303	2,73	0,5893	0,0352	3,26	0,5660	0,0382	3,68
	0,6369	0,0254	2,17	0,6131	0,0312	2,77	0,5921	0,0334	3,08	0,5695	0,0365	3,49
	0,6372	0,0263	2,25	0,6131	0,0287	2,55	0,5921	0,0337	3,10	0,5750	0,0370	3,51
30	0,6386	0,0268	2,29	0,6098	0,0307	2,74	0,5925	0,0321	2,95	0,5583	0,0368	3,59
	0,6410	0,0271	2,30	0,6078	0,0303	2,72	0,5948	0,0342	3,13	0,5627	0,0362	3,51
	0,6425	0,0264	2,24	0,6064	0,0317	2,85	0,5928	0,0334	3,07	0,5660	0,0381	3,67
40	0,6300	0,0247	2,14	0,6030	0,0313	2,83	0,5882	0,0339	3,14	0,5640	0,0367	3,55
	0,6358	0,0254	2,18	0,6040	0,0310	2,80	0,5890	0,0343	3,17	0,5588	0,0350	3,41
	0,6324	0,0249	2,15	0,6052	0,0308	2,77	0,5886	0,0340	3,15	0,5588	0,0371	3,62
50	0,6218	0,0259	2,27	0,5934	0,0303	2,78	0,5853	0,0343	3,19	0,5566	0,0371	3,63
	0,6362	0,0267	2,29	0,6063	0,0312	2,81	0,5844	0,0324	3,02	0,5705	0,0366	3,50
	0,6329	0,0265	2,28	0,6050	0,0302	2,72	0,5883	0,0336	3,11	0,5653	0,0356	3,43
60	0,6310	0,0271	2,34	0,5995	0,0331	3,01	0,5838	0,0353	3,30	0,5627	0,0377	3,65
	0,6326	0,0267	2,30	0,6049	0,0300	2,70	0,5849	0,0339	3,16	0,5685	0,0377	3,62
	0,6350	0,0273	2,34	0,6048	0,0303	2,73	0,5908	0,0339	3,13	0,5670	0,0376	3,62
70	-	-	-	0,6024	0,0309	2,80	0,5828	0,0328	3,07	0,5646	0,0382	3,69
	-	-	-	0,6066	0,0315	2,83	0,5884	0,0345	3,20	0,5656	0,0369	3,56
	-	-	-	0,6085	0,0318	2,85	0,5877	0,0347	3,22	0,5649	0,0385	3,72
80	-	-	-	0,6069	0,0317	2,85	0,5862	0,0351	3,26	0,5614	0,0374	3,63
	-	-	-	0,5984	0,0315	2,87	0,5908	0,0350	3,23	0,5651	0,0364	3,51
	-	-	-	0,6069	0,0322	2,89	0,5949	0,0343	3,14	0,5683	0,0373	3,58
90	-	-	-	0,6036	0,0309	2,79	0,5863	0,0358	3,33	0,5611	0,0388	3,77
	-	-	-	0,6040	0,0315	2,84	0,5925	0,0342	3,15	0,5579	0,0383	3,74
	-	-	-	0,6051	0,0315	2,84	0,5890	0,0336	3,11	0,5698	0,0385	3,68
100	-	-	-	0,5961	0,0328	3,00	0,5785	0,0342	3,22	0,5580	0,0387	3,78
	-	-	-	0,5929	0,0330	3,03	0,5879	0,0359	3,33	0,5664	0,0376	3,62
	-	-	-	0,6061	0,0334	3,00	0,5862	0,0348	3,24	0,5661	0,0375	3,61
110	-	-	-	0,6021	0,0324	2,93	0,5880	0,0347	3,22	0,5614	0,0358	3,48
	-	-	-	0,6031	0,0328	2,96	0,5874	0,0352	3,27	0,5685	0,0383	3,67
	-	-	-	0,6015	0,0317	2,87	0,5890	0,0355	3,29	0,5629	0,0392	3,80
120	-	-	-	0,5988	0,0330	3,00	0,5781	0,0354	3,34	0,5574	0,0400	3,91
	-	-	-	0,5962	0,0332	3,04	0,5839	0,0373	3,48	0,5648	0,0396	3,82
	-	-	-	0,5983	0,0344	3,13	0,5840	0,0366	3,42	0,5635	0,0396	3,83

Tabela A3 – Resistividade elétrica ao longo do tempo para diferentes relações a/c - amostra 1 (CPIV-32).

Amostra 1, CPIV-32												
Relação a/c	0,35			0,45			0,55			0,65		
Tempo (min)	V _o (V)	V (V)	ρ ($\Omega.m$)	V _o (V)	V (V)	ρ ($\Omega.m$)	V _o (V)	V (V)	ρ ($\Omega.m$)	V _o (V)	V (V)	ρ ($\Omega.m$)
0	0,5770	0,0287	2,71	0,5654	0,0382	3,68	0,5524	0,0394	3,89	0,5406	0,0458	4,62
	0,5616	0,0295	2,86	0,5667	0,0373	3,59	0,5572	0,0389	3,81	0,5498	0,0437	4,33
	0,5644	0,0293	2,83	0,5718	0,0374	3,57	0,5614	0,0377	3,66	0,5503	0,0423	4,19
10	0,5923	0,0303	2,79	0,5700	0,0364	3,48	0,5576	0,0404	3,95	0,5471	0,0455	4,53
	0,6011	0,0304	2,76	0,5797	0,0364	3,42	0,5622	0,0392	3,80	0,5489	0,0464	4,61
	0,6036	0,0306	2,76	0,5782	0,0355	3,35	0,5595	0,0391	3,81	0,5517	0,0464	4,59
20	0,5983	0,0304	2,77	0,5747	0,0370	3,51	0,5551	0,0400	3,93	0,5343	0,0475	4,85
	0,5979	0,0306	2,79	0,5759	0,0369	3,49	0,5593	0,0382	3,72	0,5424	0,0473	4,75
	0,5962	0,0306	2,80	0,5707	0,0359	3,43	0,5574	0,0392	3,83	0,5370	0,0450	4,57
30	0,5873	0,0298	2,77	0,5635	0,0365	3,53	0,5542	0,0403	3,96	0,5318	0,0452	4,63
	0,5803	0,0298	2,80	0,5722	0,0360	3,43	0,5637	0,0408	3,95	0,5386	0,0461	4,67
	0,5790	0,0295	2,78	0,5780	0,0362	3,41	0,5594	0,0402	3,92	0,5354	0,0467	4,76
40	0,5983	0,0315	2,87	0,5733	0,0361	3,43	0,5531	0,0404	3,98	0,5346	0,0468	4,77
	0,5963	0,0313	2,86	0,5686	0,0355	3,40	0,5535	0,0409	4,03	0,5351	0,0465	4,74
	0,5950	0,0312	2,86	0,5741	0,0378	3,59	0,5616	0,0409	3,97	0,5319	0,0471	4,83
50	0,5837	0,0296	2,76	0,5740	0,0355	3,37	0,5481	0,0416	4,14	0,5292	0,0485	5,00
	0,5921	0,0312	2,87	0,5754	0,0371	3,52	0,5501	0,0418	4,14	0,5337	0,0485	4,95
	0,5951	0,0303	2,78	0,5732	0,0367	3,49	0,5582	0,0410	4,00	0,5345	0,0472	4,81
60	0,5955	0,0307	2,81	0,5718	0,0354	3,38	0,5514	0,0430	4,25	0,5305	0,0494	5,08
	0,5949	0,0311	2,85	0,5772	0,0367	3,47	0,5507	0,0418	4,14	0,5367	0,0474	4,81
	0,5825	0,0313	2,93	0,5774	0,0368	3,47	0,5561	0,0411	4,03	0,5408	0,0490	4,94
70	-	-	-	0,5713	0,0372	3,55	0,5477	0,0432	4,30	0,5319	0,0495	5,07
	-	-	-	0,5719	0,0376	3,58	0,5530	0,0417	4,11	0,5349	0,0487	4,96
	-	-	-	0,5733	0,0363	3,45	0,5556	0,0410	4,02	0,5345	0,0489	4,99
80	-	-	-	0,5604	0,0369	3,59	0,5438	0,0415	4,16	0,5302	0,0490	5,04
	-	-	-	0,5688	0,0350	3,35	0,5565	0,0423	4,14	0,5375	0,0487	4,94
	-	-	-	0,5734	0,0363	3,45	0,5592	0,0421	4,10	0,5386	0,0468	4,74
90	-	-	-	0,5704	0,0385	3,68	0,5521	0,0418	4,13	0,5316	0,0492	5,05
	-	-	-	0,5692	0,0367	3,52	0,5545	0,0413	4,06	0,5304	0,0492	5,06
	-	-	-	0,5692	0,0350	3,35	0,5568	0,0400	3,92	0,5393	0,0496	5,01
100	-	-	-	0,5707	0,0378	3,61	0,5539	0,0422	4,15	0,5346	0,0500	5,10
	-	-	-	0,5694	0,0373	3,57	0,5574	0,0433	4,24	0,5361	0,0502	5,11
	-	-	-	0,5689	0,0372	3,56	0,5586	0,0423	4,13	0,5318	0,0484	4,96
110	-	-	-	0,5730	0,0360	3,43	0,5504	0,0425	4,21	0,5290	0,0498	5,13
	-	-	-	0,5732	0,0384	3,65	0,5512	0,0422	4,17	0,5246	0,0510	5,30
	-	-	-	0,5727	0,0381	3,63	0,5509	0,0436	4,31	0,5273	0,0478	4,94
120	-	-	-	0,5704	0,0377	3,60	0,5415	0,0435	4,38	0,5233	0,0496	5,17
	-	-	-	0,5701	0,0381	3,64	0,5443	0,0435	4,36	0,5244	0,0480	4,99
	-	-	-	0,5777	0,0390	3,68	0,5506	0,0428	4,24	0,5300	0,0475	4,89

Tabela A4 – Resistividade elétrica ao longo do tempo para diferentes relações a/c - amostra 2 (CPIV-32).

Amostra 2, CPIV-32												
Relação a/c	0,35			0,45			0,55			0,65		
Tempo (min)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)
0	0,5967	0,0320	2,92	0,5757	0,0377	3,57	0,5541	0,0404	3,97	0,5303	0,0446	4,59
	0,5883	0,0320	2,97	0,5769	0,0364	3,44	0,5567	0,0411	4,02	0,5489	0,0445	4,42
	0,5891	0,0318	2,94	0,5749	0,0355	3,37	0,5628	0,0394	3,82	0,5439	0,0460	4,61
10	0,5895	0,0311	2,88	0,5664	0,0363	3,49	0,5507	0,0415	4,11	0,5347	0,0478	4,87
	0,5852	0,0311	2,90	0,5786	0,0367	3,46	0,5613	0,0409	3,97	0,5342	0,0458	4,67
	0,5862	0,0308	2,86	0,5751	0,0360	3,41	0,5595	0,0402	3,92	0,5328	0,0455	4,66
20	0,5909	0,0305	2,81	0,5694	0,0387	3,71	0,5541	0,0392	3,86	0,5335	0,0462	4,72
	0,5925	0,0318	2,93	0,5741	0,0367	3,49	0,5556	0,0403	3,95	0,5447	0,0461	4,61
	0,5918	0,0318	2,93	0,5752	0,0381	3,61	0,5536	0,0408	4,02	0,5424	0,0449	4,51
30	0,5927	0,0315	2,90	0,5624	0,0382	3,70	0,5482	0,0403	4,01	0,5416	0,0480	4,83
	0,5957	0,0332	3,04	0,5719	0,0374	3,57	0,5557	0,0405	3,97	0,5397	0,0473	4,78
	0,5981	0,0330	3,01	0,5796	0,0374	3,52	0,5589	0,0412	4,02	0,5327	0,0472	4,83
40	0,5924	0,0322	2,96	0,5676	0,0388	3,73	0,5538	0,0410	4,04	0,5299	0,0472	4,86
	0,5996	0,0325	2,96	0,5715	0,0376	3,59	0,5567	0,0436	4,27	0,5411	0,0487	4,91
	0,5930	0,0321	2,95	0,5695	0,0380	3,64	0,5533	0,0403	3,97	0,5386	0,0463	4,69
50	0,5809	0,0303	2,84	0,5684	0,0377	3,62	0,5527	0,0409	4,03	0,5361	0,0495	5,03
	0,5820	0,0313	2,93	0,5703	0,0376	3,59	0,5521	0,0418	4,13	0,5305	0,0470	4,83
	0,5844	0,0331	3,09	0,5669	0,0383	3,68	0,5572	0,0401	3,92	0,5362	0,0484	4,92
60	0,5975	0,0315	2,87	0,5628	0,0392	3,80	0,5509	0,0405	4,01	0,5371	0,0486	4,93
	0,5962	0,0321	2,94	0,5676	0,0388	3,73	0,5522	0,0406	4,01	0,5332	0,0488	4,99
	0,5928	0,0322	2,96	0,5691	0,0387	3,71	0,5534	0,0423	4,17	0,5288	0,0479	4,94
70	-	-	-	0,5638	0,0393	3,80	0,5508	0,0424	4,20	0,5296	0,0480	4,94
	-	-	-	0,5668	0,0381	3,66	0,5590	0,0410	4,00	0,5300	0,0480	4,94
	-	-	-	0,5613	0,0373	3,62	0,5568	0,0403	3,95	0,5337	0,0466	4,76
80	-	-	-	0,5616	0,0372	3,61	0,5522	0,0419	4,14	0,5348	0,0490	5,00
	-	-	-	0,5679	0,0369	3,54	0,5546	0,0400	3,93	0,5353	0,0512	5,21
	-	-	-	0,5691	0,0374	3,58	0,5582	0,0405	3,96	0,5314	0,0501	5,14
90	-	-	-	0,5647	0,0396	3,82	0,5520	0,0416	4,11	0,5312	0,0485	4,98
	-	-	-	0,5621	0,0379	3,68	0,5505	0,0394	3,90	0,5389	0,0479	4,85
	-	-	-	0,5686	0,0372	3,57	0,5533	0,0422	4,16	0,5326	0,0480	4,91
100	-	-	-	0,5621	0,0392	3,80	0,5475	0,0417	4,15	0,5330	0,0502	5,13
	-	-	-	0,5685	0,0393	3,77	0,5570	0,0433	4,24	0,5329	0,0490	5,01
	-	-	-	0,5668	0,0394	3,79	0,5538	0,0432	4,25	0,5323	0,0492	5,04
110	-	-	-	0,5640	0,0390	3,77	0,5470	0,0416	4,15	0,5349	0,0490	4,99
	-	-	-	0,5511	0,0386	3,82	0,5502	0,0421	4,17	0,5337	0,0482	4,92
	-	-	-	0,5631	0,0377	3,65	0,5550	0,0442	4,34	0,5352	0,0493	5,02
120	-	-	-	0,5635	0,0393	3,80	0,5476	0,0432	4,30	0,5295	0,0473	4,87
	-	-	-	0,5762	0,0366	3,46	0,5536	0,0424	4,18	0,5285	0,0512	5,28
	-	-	-	0,5720	0,0368	3,51	0,5513	0,0415	4,10	0,5369	0,0509	5,17

Tabela A5 – Resistividade elétrica ao longo do tempo para diferentes relações a/c - amostra 1 (CPIII-40).

Amostra 1, CPIII-40												
Relação a/c	0,35			0,45			0,55			0,65		
Tempo (min)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)
0	0,4966	0,0456	5,01	0,4651	0,0545	6,39	0,4671	0,0564	6,58	0,4534	0,0633	7,61
	0,5088	0,0467	5,00	0,4723	0,0572	6,60	0,4736	0,0561	6,46	0,4607	0,0597	7,06
	0,5054	0,0461	4,97	0,4693	0,0576	6,69	0,4764	0,0558	6,39	0,4629	0,0597	7,03
10	0,5075	0,0461	4,95	0,4742	0,0573	6,59	0,4693	0,0590	6,85	0,4530	0,0628	7,56
	0,5025	0,0475	5,15	0,4832	0,0575	6,49	0,4729	0,0560	6,46	0,4542	0,0598	7,18
	0,5085	0,0457	4,90	0,4851	0,0550	6,18	0,4781	0,0575	6,56	0,4576	0,0601	7,16
20	0,5194	0,0434	4,56	0,4761	0,0571	6,54	0,4711	0,0607	7,02	0,4592	0,0592	7,03
	0,5117	0,0464	4,94	0,4777	0,0552	6,30	0,4738	0,0590	6,79	0,4630	0,0611	7,19
	0,5133	0,0447	4,75	0,4752	0,0539	6,18	0,4758	0,0569	6,52	0,4665	0,0614	7,18
30	0,5128	0,0439	4,67	0,4769	0,0549	6,28	0,4800	0,0558	6,34	0,4605	0,0639	7,57
	0,5103	0,0432	4,62	0,4849	0,0547	6,15	0,4737	0,0562	6,47	0,4644	0,0589	6,91
	0,5063	0,0438	4,72	0,4849	0,0554	6,23	0,4792	0,0569	6,47	0,4634	0,0601	7,07
40	0,5159	0,0428	4,52	0,4800	0,0531	6,03	0,4798	0,0606	6,89	0,4646	0,0607	7,12
	0,5090	0,0468	5,01	0,4824	0,0554	6,26	0,4812	0,0579	6,56	0,4642	0,0584	6,86
	0,5132	0,0451	4,79	0,4820	0,0550	6,22	0,4830	0,0592	6,68	0,4732	0,0598	6,89
50	0,5137	0,0428	4,54	0,4788	0,0535	6,09	0,4696	0,0575	6,68	0,4626	0,0595	7,01
	0,5166	0,0456	4,81	0,4815	0,0534	6,05	0,4817	0,0579	6,55	0,4675	0,0590	6,88
	0,5136	0,0443	4,70	0,4847	0,0546	6,14	0,4811	0,0558	6,32	0,4761	0,0601	6,88
60	0,5300	0,0430	4,42	0,4819	0,0525	5,94	0,4781	0,0566	6,45	0,4657	0,0604	7,07
	0,5106	0,0420	4,48	0,4810	0,0518	5,87	0,4772	0,0547	6,25	0,4670	0,0625	7,30
	0,5201	0,0446	4,68	0,4738	0,0537	6,18	0,4824	0,0556	6,28	0,4680	0,0605	7,05
70	-	-	-	0,4860	0,0546	6,12	0,4736	0,0573	6,60	0,4622	0,0613	7,23
	-	-	-	0,4959	0,0516	5,67	0,4806	0,0594	6,74	0,4723	0,0603	6,96
	-	-	-	0,4921	0,0540	5,98	0,4815	0,0592	6,70	0,4689	0,0587	6,82
80	-	-	-	0,4847	0,0526	5,92	0,4810	0,0553	6,27	0,4714	0,0609	7,04
	-	-	-	0,4895	0,0504	5,61	0,4846	0,0560	6,30	0,4711	0,0614	7,11
	-	-	-	0,4860	0,0516	5,79	0,4807	0,0556	6,31	0,4739	0,0615	7,07
90	-	-	-	0,4847	0,0505	5,68	0,4738	0,0562	6,47	0,4737	0,0586	6,74
	-	-	-	0,4900	0,0521	5,80	0,4824	0,0573	6,48	0,4774	0,0576	6,58
	-	-	-	0,4958	0,0523	5,75	0,4811	0,0570	6,46	0,4730	0,0579	6,67
100	-	-	-	0,4840	0,0525	5,91	0,4773	0,0550	6,28	0,4730	0,0571	6,58
	-	-	-	0,4953	0,0542	5,97	0,4855	0,0554	6,22	0,4767	0,0573	6,55
	-	-	-	0,4885	0,0536	5,98	0,4878	0,0562	6,28	0,4751	0,0584	6,70
110	-	-	-	0,4933	0,0545	6,02	0,4774	0,0567	6,47	0,4741	0,0593	6,82
	-	-	-	0,4982	0,0524	5,73	0,4860	0,0568	6,37	0,4728	0,0587	6,77
	-	-	-	0,4855	0,0529	5,94	0,4855	0,0548	6,15	0,4722	0,0589	6,80
120	-	-	-	0,4837	0,0541	6,10	0,4865	0,0561	6,29	0,4778	0,0594	6,78
	-	-	-	0,4956	0,0523	5,75	0,4800	0,0550	6,25	0,4824	0,0593	6,70
	-	-	-	0,4955	0,0504	5,55	0,4896	0,0568	6,32	0,4758	0,0587	6,73

Tabela A6 – Resistividade elétrica ao longo do tempo para diferentes relações a/c - amostra 2 (CPIII-40).

Amostra 2, CPIII-40												
Relação a/c	0,35			0,45			0,55			0,65		
Tempo (min)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)
0	0,5014	0,0476	5,18	0,4725	0,0534	6,16	0,4628	0,0585	6,89	0,4465	0,0613	7,48
	0,5069	0,0488	5,25	0,4810	0,0558	6,32	0,4691	0,0574	6,67	0,4564	0,0603	7,20
	0,5014	0,0453	4,93	0,4793	0,0572	6,51	0,4760	0,0575	6,59	0,4575	0,0608	7,25
10	0,5034	0,0487	5,27	0,4751	0,0524	6,01	0,4697	0,0573	6,65	0,4607	0,0589	6,97
	0,5014	0,0462	5,02	0,4823	0,0534	6,04	0,4788	0,0573	6,52	0,4630	0,0592	6,97
	0,5121	0,0481	5,12	0,4831	0,0542	6,12	0,4809	0,0558	6,33	0,4687	0,0575	6,69
20	0,5087	0,0457	4,90	0,4674	0,0541	6,31	0,4767	0,0558	6,38	0,4607	0,0608	7,19
	0,5024	0,0437	4,74	0,4862	0,0550	6,17	0,4815	0,0576	6,52	0,4603	0,0588	6,96
	0,5035	0,0455	4,93	0,4860	0,0529	5,93	0,4829	0,0554	6,25	0,4614	0,0604	7,14
30	0,5015	0,0468	5,09	0,4868	0,0523	5,86	0,4819	0,0541	6,12	0,4636	0,0636	7,48
	0,5145	0,0466	4,94	0,4837	0,0524	5,91	0,4780	0,0539	6,15	0,4654	0,0594	6,96
	0,5128	0,0417	4,43	0,4811	0,0543	6,15	0,4789	0,0558	6,35	0,4648	0,0615	7,21
40	0,5106	0,0448	4,78	0,4759	0,0542	6,21	0,4852	0,0559	6,28	0,4598	0,0645	7,65
	0,5228	0,0457	4,77	0,4819	0,0549	6,21	0,4868	0,0540	6,05	0,4589	0,0626	7,44
	0,5217	0,0440	4,60	0,4914	0,0530	5,88	0,4893	0,0554	6,17	0,4663	0,0617	7,21
50	0,5214	0,0441	4,61	0,4827	0,0532	6,01	0,4862	0,0566	6,35	0,4562	0,0606	7,24
	0,5198	0,0432	4,53	0,4804	0,0560	6,36	0,4867	0,0545	6,10	0,4683	0,0626	7,29
	0,5085	0,0436	4,67	0,4885	0,0522	5,83	0,4863	0,0542	6,08	0,4620	0,0628	7,41
60	0,5075	0,0471	5,06	0,4818	0,0543	6,14	0,4900	0,0566	6,30	0,4582	0,0606	7,21
	0,5109	0,0458	4,89	0,4888	0,0516	5,76	0,4821	0,0552	6,24	0,4676	0,0587	6,84
	0,5056	0,0477	5,14	0,4878	0,0530	5,92	0,4918	0,0552	6,12	0,4672	0,0589	6,87
70	-	-	-	0,4869	0,0525	5,88	0,4804	0,0567	6,43	0,4619	0,0614	7,25
	-	-	-	0,4871	0,0509	5,70	0,4890	0,0563	6,28	0,4675	0,0613	7,15
	-	-	-	0,4932	0,0515	5,69	0,4858	0,0553	6,21	0,4662	0,0597	6,98
80	-	-	-	0,4824	0,0519	5,87	0,4727	0,0556	6,41	0,4644	0,0620	7,28
	-	-	-	0,4937	0,0529	5,84	0,4846	0,0555	6,24	0,4704	0,0594	6,88
	-	-	-	0,4959	0,0523	5,75	0,4870	0,0564	6,31	0,4679	0,0586	6,83
90	-	-	-	0,4958	0,0516	5,67	0,4877	0,0570	6,37	0,4711	0,0598	6,92
	-	-	-	0,4956	0,0506	5,57	0,4862	0,0572	6,41	0,4683	0,0592	6,89
	-	-	-	0,4908	0,0507	5,63	0,4947	0,0565	6,23	0,4689	0,0596	6,93
100	-	-	-	0,4906	0,0539	5,99	0,4831	0,0562	6,34	0,4674	0,0622	7,26
	-	-	-	0,4971	0,0528	5,79	0,4896	0,0559	6,22	0,4729	0,0621	7,16
	-	-	-	0,4967	0,0522	5,73	0,4908	0,0551	6,12	0,4731	0,0589	6,79
110	-	-	-	0,4966	0,0511	5,61	0,4915	0,0555	6,16	0,4753	0,0615	7,05
	-	-	-	0,4934	0,0525	5,80	0,4887	0,0537	5,99	0,4739	0,0597	6,87
	-	-	-	0,4927	0,0543	6,01	0,5018	0,0554	6,02	0,4736	0,0582	6,70
120	-	-	-	0,4932	0,0518	5,73	0,4861	0,0560	6,28	0,4774	0,0619	7,07
	-	-	-	0,4988	0,0529	5,78	0,4848	0,0560	6,30	0,4697	0,0595	6,91
	-	-	-	0,5004	0,0525	5,72	0,4951	0,0560	6,17	0,4801	0,0593	6,73

Tabela A7 – Resistividade elétrica ao longo do tempo para diferentes relações a/c - amostra 1 (CPII-Z-32).

Amostra 1, CPII-Z-32												
Relação a/c	0,35			0,45			0,55			0,65		
Tempo (min)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)
0	0,6068	0,0289	2,60	0,5934	0,0329	3,02	0,5844	0,0333	3,11	0,5619	0,0400	3,88
	0,6118	0,0283	2,52	0,6012	0,0313	2,84	0,5934	0,0341	3,13	0,5644	0,0395	3,82
	0,6120	0,0284	2,53	0,5976	0,0307	2,80	0,5931	0,0317	2,91	0,5689	0,0400	3,83
10	0,5974	0,0264	2,41	0,5971	0,0303	2,77	0,5823	0,0352	3,30	0,5669	0,0381	3,66
	0,6100	0,0271	2,42	0,6005	0,0300	2,72	0,5889	0,0341	3,16	0,5708	0,0389	3,72
	0,6162	0,0280	2,48	0,6042	0,0301	2,72	0,5897	0,0332	3,07	0,5708	0,0393	3,75
20	0,6168	0,0249	2,20	0,5900	0,0323	2,98	0,5812	0,0366	3,43	0,5628	0,0423	4,10
	0,6193	0,0255	2,24	0,5954	0,0312	2,86	0,5895	0,0348	3,22	0,5649	0,0404	3,90
	0,6089	0,0274	2,45	0,6004	0,0305	2,77	0,5869	0,0335	3,11	0,5702	0,0407	3,89
30	0,6197	0,0270	2,38	0,5996	0,0317	2,88	0,5845	0,0339	3,16	0,5638	0,0429	4,15
	0,6158	0,0269	2,38	0,6015	0,0321	2,91	0,5867	0,0340	3,16	0,5678	0,0396	3,80
	0,6199	0,0278	2,44	0,5986	0,0308	2,81	0,5938	0,0342	3,14	0,5703	0,0428	4,09
40	0,6132	0,0268	2,38	0,5937	0,0312	2,87	0,5840	0,0353	3,30	0,5584	0,0418	4,08
	0,6139	0,0268	2,38	0,6001	0,0311	2,83	0,5891	0,0354	3,28	0,5643	0,0410	3,96
	0,6127	0,0260	2,31	0,6009	0,0307	2,79	0,5860	0,0344	3,20	0,5614	0,0409	3,97
50	0,6155	0,0262	2,32	0,5980	0,0317	2,89	0,5796	0,0359	3,38	0,5627	0,0425	4,12
	0,6190	0,0274	2,41	0,5944	0,0310	2,84	0,5862	0,0369	3,43	0,5612	0,0418	4,06
	0,6146	0,0275	2,44	0,5964	0,0332	3,03	0,5882	0,0356	3,30	0,5622	0,0415	4,02
60	0,6110	0,0262	2,34	0,5884	0,0323	2,99	0,5869	0,0358	3,33	0,5570	0,0435	4,26
	0,6149	0,0258	2,29	0,5982	0,0320	2,92	0,5917	0,0346	3,19	0,5699	0,0408	3,90
	0,6117	0,0268	2,39	0,5976	0,0311	2,84	0,5920	0,0341	3,14	0,5667	0,0437	4,20
70	-	-	-	0,5992	0,0323	2,94	0,5844	0,0346	3,23	0,5584	0,0435	4,25
	-	-	-	0,5982	0,0317	2,89	0,5847	0,0346	3,23	0,5644	0,0431	4,16
	-	-	-	0,5986	0,0305	2,78	0,5924	0,0357	3,29	0,5591	0,0436	4,25
80	-	-	-	0,5950	0,0323	2,96	0,5838	0,0360	3,36	0,5732	0,0393	3,74
	-	-	-	0,5970	0,0327	2,99	0,5884	0,0350	3,24	0,5665	0,0392	3,77
	-	-	-	0,5983	0,0319	2,91	0,5904	0,0351	3,24	0,5717	0,0420	4,01
90	-	-	-	0,5975	0,0318	2,90	0,5887	0,0356	3,30	0,5675	0,0390	3,75
	-	-	-	0,5990	0,0307	2,79	0,5921	0,0352	3,24	0,5758	0,0398	3,77
	-	-	-	0,5970	0,0314	2,87	0,5912	0,0348	3,21	0,5784	0,0392	3,69
100	-	-	-	0,5977	0,0304	2,77	0,5896	0,0362	3,35	0,5740	0,0397	3,77
	-	-	-	0,6013	0,0313	2,84	0,5911	0,0353	3,26	0,5714	0,0402	3,84
	-	-	-	0,6009	0,0334	3,03	0,5868	0,0353	3,28	0,5709	0,0406	3,88
110	-	-	-	0,5944	0,0318	2,92	0,5937	0,0351	3,22	0,5817	0,0376	3,52
	-	-	-	0,5960	0,0312	2,85	0,5947	0,0356	3,26	0,5785	0,0385	3,63
	-	-	-	0,5936	0,0314	2,88	0,5939	0,0342	3,14	0,5751	0,0393	3,73
120	-	-	-	0,5921	0,0323	2,97	0,5869	0,0346	3,21	0,5808	0,0387	3,63
	-	-	-	0,5933	0,0333	3,06	0,5893	0,0343	3,17	0,5748	0,0381	3,61
	-	-	-	0,5948	0,0336	3,08	0,5919	0,0332	3,06	0,5801	0,0398	3,74

Tabela A8 – Resistividade elétrica ao longo do tempo para diferentes relações a/c - amostra 2 (CPII-Z-32).

Amostra 2, CPII-Z-32												
Relação a/c	0,35			0,45			0,55			0,65		
Tempo (min)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)
0	0,6115	0,0267	2,38	0,5936	0,0312	2,87	0,5872	0,0341	3,17	0,5610	0,0406	3,95
	0,6146	0,0261	2,32	0,6010	0,0315	2,86	0,5880	0,0335	3,11	0,5691	0,0387	3,71
	0,6257	0,0269	2,34	0,6045	0,0306	2,76	0,5883	0,0335	3,10	0,5711	0,0391	3,73
10	0,6171	0,0270	2,39	0,5947	0,0316	2,90	0,5843	0,0340	3,17	0,5689	0,0402	3,85
	0,6168	0,0256	2,26	0,5956	0,0309	2,83	0,5929	0,0341	3,14	0,5663	0,0414	3,99
	0,6143	0,0244	2,17	0,5971	0,0308	2,81	0,5923	0,0342	3,15	0,5651	0,0411	3,97
20	0,6138	0,0245	2,18	0,5972	0,0318	2,90	0,5798	0,0353	3,32	0,5621	0,0407	3,95
	0,6195	0,0253	2,23	0,6008	0,0303	2,75	0,5822	0,0346	3,24	0,5621	0,0410	3,98
	0,6196	0,0254	2,23	0,5978	0,0302	2,75	0,5855	0,0341	3,18	0,5680	0,0411	3,94
30	0,6141	0,0266	2,36	0,6007	0,0315	2,86	0,5831	0,0333	3,11	0,5661	0,0412	3,97
	0,6209	0,0287	2,52	0,6012	0,0305	2,77	0,5910	0,0341	3,15	0,5656	0,0403	3,88
	0,6168	0,0275	2,43	0,6010	0,0296	2,69	0,5918	0,0348	3,21	0,5631	0,0405	3,92
40	0,6148	0,0270	2,39	0,5937	0,0316	2,90	0,5769	0,0374	3,53	0,5534	0,0413	4,07
	0,6157	0,0275	2,44	0,6008	0,0326	2,96	0,5852	0,0349	3,25	0,5577	0,0415	4,06
	0,6180	0,0275	2,43	0,5980	0,0314	2,86	0,5897	0,0353	3,26	0,5593	0,0413	4,03
50	0,6130	0,0268	2,38	0,5922	0,0325	2,99	0,5834	0,0373	3,49	0,5621	0,0443	4,30
	0,6095	0,0272	2,43	0,5986	0,0304	2,77	0,5905	0,0351	3,24	0,5658	0,0423	4,08
	0,6154	0,0290	2,57	0,6006	0,0297	2,70	0,5912	0,0354	3,26	0,5674	0,0405	3,89
60	0,6167	0,0272	2,40	0,5990	0,0318	2,89	0,5877	0,0352	3,27	0,5670	0,0430	4,13
	0,6109	0,0275	2,45	0,5997	0,0321	2,92	0,5875	0,0350	3,25	0,5637	0,0414	4,00
	0,6165	0,0274	2,42	0,5978	0,0318	2,90	0,5883	0,0349	3,23	0,5660	0,0421	4,06
70	-	-	-	0,5961	0,0321	2,94	0,5877	0,0355	3,29	0,5682	0,0423	4,06
	-	-	-	0,5952	0,0328	3,00	0,5951	0,0344	3,15	0,5659	0,0400	3,85
	-	-	-	0,5932	0,0323	2,97	0,5913	0,0330	3,04	0,5673	0,0399	3,83
80	-	-	-	0,5985	0,0318	2,90	0,5868	0,0356	3,31	0,5642	0,0430	4,16
	-	-	-	0,5969	0,0315	2,88	0,5880	0,0342	3,17	0,5710	0,0416	3,97
	-	-	-	0,5900	0,0316	2,92	0,5934	0,0346	3,18	0,5752	0,0410	3,89
90	-	-	-	0,5930	0,0310	2,85	0,5899	0,0362	3,35	0,5682	0,0410	3,93
	-	-	-	0,5921	0,0317	2,92	0,5918	0,0357	3,29	0,5718	0,0406	3,87
	-	-	-	0,5985	0,0304	2,77	0,5896	0,0334	3,09	0,5717	0,0420	4,01
100	-	-	-	0,5943	0,0321	2,94	0,5904	0,0369	3,41	0,5708	0,0408	3,90
	-	-	-	0,5992	0,0328	2,98	0,5874	0,0356	3,30	0,5696	0,0413	3,95
	-	-	-	0,5993	0,0315	2,87	0,5897	0,0339	3,13	0,5690	0,0420	4,02
110	-	-	-	0,6008	0,0323	2,93	0,5808	0,0347	3,26	0,5694	0,0410	3,93
	-	-	-	0,5958	0,0317	2,90	0,5937	0,0349	3,20	0,5687	0,0418	4,01
	-	-	-	0,5933	0,0312	2,87	0,5928	0,0324	2,98	0,5705	0,0408	3,90
120	-	-	-	0,5974	0,0322	2,94	0,5845	0,0352	3,28	0,5660	0,0430	4,14
	-	-	-	0,5998	0,0328	2,98	0,5934	0,0347	3,19	0,5659	0,0402	3,87
	-	-	-	0,6003	0,0325	2,95	0,5961	0,0337	3,08	0,5720	0,0416	3,96

Tabela A9 – Resistividade elétrica ao longo do tempo para diferentes relações a/c - amostra 1 (CPII-F-32).

Amostra 1, CPII-F-32												
Relação a/c	0,35			0,45			0,55			0,65		
Tempo (min)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)
0	0,6237	0,0251	2,19	0,6143	0,0285	2,53	0,6015	0,0321	2,91	0,5875	0,0331	3,07
	0,6354	0,0261	2,24	0,6244	0,0275	2,40	0,6037	0,0309	2,79	0,5890	0,0335	3,10
	0,6327	0,0255	2,20	0,6212	0,0273	2,40	0,6067	0,0312	2,80	0,5846	0,0323	3,01
10	0,6242	0,0251	2,19	0,6218	0,0267	2,34	0,6044	0,0319	2,88	0,5818	0,0345	3,23
	0,6308	0,0253	2,19	0,6218	0,0273	2,39	0,6040	0,0295	2,66	0,5833	0,0345	3,22
	0,6338	0,0245	2,11	0,6228	0,0274	2,40	0,6071	0,0307	2,76	0,5857	0,0346	3,22
20	0,6333	0,0248	2,13	0,6184	0,0263	2,32	0,6066	0,0299	2,69	0,5813	0,0340	3,19
	0,6321	0,0244	2,10	0,6176	0,0262	2,31	0,6117	0,0298	2,66	0,5848	0,0332	3,10
	0,6333	0,0248	2,13	0,6177	0,0258	2,28	0,6083	0,0296	2,65	0,5861	0,0335	3,12
30	0,6249	0,0240	2,09	0,6227	0,0272	2,38	0,6028	0,0317	2,87	0,5872	0,0346	3,21
	0,6311	0,0246	2,13	0,6186	0,0271	2,39	0,6043	0,0296	2,67	0,5887	0,0340	3,15
	0,6286	0,0248	2,15	0,6184	0,0269	2,37	0,5985	0,0298	2,71	0,5897	0,0338	3,12
40	0,6317	0,0257	2,22	0,6107	0,0272	2,43	0,5996	0,0316	2,87	0,5795	0,0365	3,43
	0,6284	0,0263	2,28	0,6153	0,0267	2,37	0,5988	0,0315	2,87	0,5869	0,0354	3,29
	0,6302	0,0253	2,19	0,6184	0,0267	2,35	0,6062	0,0306	2,75	0,5838	0,0343	3,20
50	0,6286	0,0263	2,28	0,6167	0,0285	2,52	0,6043	0,0322	2,90	0,5847	0,0344	3,21
	0,6274	0,0263	2,29	0,6185	0,0297	2,62	0,6069	0,0306	2,75	0,5825	0,0334	3,13
	0,6286	0,0258	2,24	0,6180	0,0279	2,46	0,6074	0,0308	2,76	0,5877	0,0341	3,16
60	0,6257	0,0252	2,20	0,6175	0,0282	2,49	0,6053	0,0312	2,81	0,5902	0,0339	3,13
	0,6291	0,0245	2,12	0,6183	0,0292	2,57	0,6093	0,0315	2,82	0,5890	0,0332	3,07
	0,6327	0,0244	2,10	0,6178	0,0301	2,66	0,6079	0,0314	2,82	0,5857	0,0345	3,21
70	-	-	-	0,6238	0,0277	2,42	0,6094	0,0306	2,74	0,5889	0,0336	3,11
	-	-	-	0,6171	0,0281	2,48	0,6092	0,0300	2,68	0,5930	0,0333	3,06
	-	-	-	0,6189	0,0282	2,48	0,6096	0,0297	2,66	0,5817	0,0343	3,21
80	-	-	-	0,6223	0,0267	2,34	0,6048	0,0316	2,85	0,5853	0,0342	3,19
	-	-	-	0,6249	0,0280	2,44	0,6087	0,0304	2,72	0,5911	0,0350	3,23
	-	-	-	0,6202	0,0271	2,38	0,6066	0,0313	2,81	0,5932	0,0349	3,21
90	-	-	-	0,6195	0,0285	2,51	0,6018	0,0319	2,89	0,5927	0,0350	3,22
	-	-	-	0,6221	0,0284	2,49	0,6079	0,0302	2,71	0,5851	0,0340	3,17
	-	-	-	0,6210	0,0277	2,43	0,6125	0,0315	2,80	0,5950	0,0332	3,04
100	-	-	-	0,6196	0,0277	2,44	0,6083	0,0313	2,81	0,5871	0,0340	3,16
	-	-	-	0,6177	0,0278	2,45	0,6101	0,0310	2,77	0,5927	0,0332	3,05
	-	-	-	0,6203	0,0287	2,52	0,6103	0,0301	2,69	0,5944	0,0322	2,95
110	-	-	-	0,6133	0,0289	2,57	0,6032	0,0307	2,77	0,5908	0,0337	3,11
	-	-	-	0,6203	0,0290	2,55	0,6107	0,0314	2,80	0,5934	0,0351	3,22
	-	-	-	0,6123	0,0287	2,56	0,6110	0,0302	2,69	0,5907	0,0345	3,18
120	-	-	-	0,6136	0,0300	2,67	0,6001	0,0314	2,85	0,5876	0,0349	3,24
	-	-	-	0,6125	0,0302	2,69	0,6056	0,0301	2,71	0,5924	0,0347	3,19
	-	-	-	0,6097	0,0297	2,66	0,6095	0,0304	2,72	0,5953	0,0345	3,16

Tabela A10 – Resistividade elétrica ao longo do tempo para diferentes relações a/c - amostra 2 (CPII-F-32).

Amostra 2, CPII-F-32												
Relação a/c	0,35			0,45			0,55			0,65		
Tempo (min)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)
0	0,6337	0,0271	2,33	0,6222	0,0270	2,37	0,5968	0,0332	3,03	0,5773	0,0341	3,22
	0,6274	0,0254	2,21	0,6175	0,0260	2,30	0,6039	0,0309	2,79	0,5812	0,0348	3,26
	0,6280	0,0253	2,20	0,6271	0,0255	2,22	0,6080	0,0302	2,71	0,5843	0,0347	3,24
10	0,6289	0,0250	2,17	0,6200	0,0270	2,37	0,5993	0,0316	2,87	0,5913	0,0347	3,20
	0,6295	0,0253	2,19	0,6235	0,0279	2,44	0,6061	0,0294	2,64	0,5911	0,0331	3,05
	0,6283	0,0252	2,19	0,6206	0,0264	2,32	0,6066	0,0294	2,64	0,5875	0,0328	3,04
20	0,6279	0,0255	2,21	0,6179	0,0268	2,36	0,6032	0,0313	2,83	0,5876	0,0362	3,36
	0,6341	0,0252	2,17	0,6221	0,0282	2,47	0,6017	0,0318	2,88	0,5890	0,0351	3,25
	0,6308	0,0261	2,26	0,6203	0,0276	2,43	0,6047	0,0300	2,70	0,5928	0,0336	3,09
30	0,6268	0,0252	2,19	0,6170	0,0285	2,52	0,5990	0,0315	2,87	0,5875	0,0349	3,24
	0,6312	0,0256	2,21	0,6204	0,0274	2,41	0,6090	0,0302	2,70	0,5892	0,0332	3,07
	0,6260	0,0256	2,23	0,6181	0,0268	2,36	0,6044	0,0304	2,74	0,5938	0,0336	3,08
40	0,6257	0,0270	2,35	0,6171	0,0259	2,29	0,6010	0,0298	2,70	0,5895	0,0349	3,23
	0,6259	0,0255	2,22	0,6212	0,0277	2,43	0,6030	0,0302	2,73	0,5829	0,0344	3,22
	0,6311	0,0248	2,14	0,6175	0,0277	2,45	0,6096	0,0295	2,64	0,5882	0,0339	3,14
50	0,6304	0,0236	2,04	0,6162	0,0288	2,55	0,6029	0,0315	2,85	0,5815	0,0357	3,35
	0,6293	0,0256	2,22	0,6169	0,0287	2,54	0,6063	0,0311	2,80	0,5843	0,0355	3,31
	0,6321	0,0251	2,16	0,6252	0,0270	2,35	0,6080	0,0316	2,83	0,5831	0,0340	3,18
60	0,6238	0,0236	2,06	0,6154	0,0282	2,50	0,6020	0,0317	2,87	0,5804	0,0364	3,42
	0,6252	0,0257	2,24	0,6161	0,0286	2,53	0,6012	0,0317	2,87	0,5908	0,0339	3,13
	0,6317	0,0237	2,05	0,6236	0,0278	2,43	0,6031	0,0316	2,86	0,5897	0,0335	3,10
70	-	-	-	0,6236	0,0262	2,29	0,6068	0,0319	2,87	0,5880	0,0336	3,12
	-	-	-	0,6251	0,0278	2,42	0,6074	0,0320	2,87	0,5861	0,0346	3,22
	-	-	-	0,6229	0,0269	2,35	0,6031	0,0315	2,85	0,5934	0,0342	3,14
80	-	-	-	0,6144	0,0262	2,32	0,6067	0,0312	2,80	0,5876	0,0336	3,12
	-	-	-	0,6210	0,0260	2,28	0,6044	0,0303	2,73	0,5919	0,0332	3,06
	-	-	-	0,6205	0,0258	2,27	0,6025	0,0306	2,77	0,5950	0,0329	3,01
90	-	-	-	0,6207	0,0259	2,27	0,5981	0,0313	2,85	0,5908	0,0339	3,13
	-	-	-	0,6184	0,0269	2,37	0,6013	0,0297	2,69	0,5960	0,0334	3,06
	-	-	-	0,6192	0,0272	2,39	0,6096	0,0300	2,68	0,5946	0,0334	3,06
100	-	-	-	0,6258	0,0265	2,31	0,6029	0,0306	2,77	0,5848	0,0348	3,24
	-	-	-	0,6242	0,0275	2,40	0,6032	0,0304	2,75	0,5882	0,0351	3,25
	-	-	-	0,6218	0,0273	2,39	0,6059	0,0305	2,74	0,5900	0,0351	3,24
110	-	-	-	0,6186	0,0275	2,42	0,5995	0,0330	3,00	0,5946	0,0343	3,14
	-	-	-	0,6151	0,0292	2,59	0,6041	0,0328	2,96	0,5984	0,0351	3,20
	-	-	-	0,6156	0,0291	2,58	0,6102	0,0315	2,81	0,5948	0,0350	3,21
120	-	-	-	0,6126	0,0275	2,45	0,5990	0,0313	2,85	0,5852	0,0345	3,21
	-	-	-	0,6116	0,0275	2,45	0,6056	0,0323	2,91	0,5925	0,0346	3,18
	-	-	-	0,6225	0,0279	2,44	0,6098	0,0317	2,83	0,5917	0,0339	3,12

Tabela A11 – Resistividade elétrica ao longo do tempo para diferentes relações a/c - amostra 1 (CPII-E-40).

Amostra 1, CPII-E-40												
Relação a/c	0,35			0,45			0,55			0,65		
Tempo (min)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)
0	0,6076	0,0308	2,76	0,5810	0,0351	3,29	0,5469	0,0414	4,13	0,5184	0,0463	4,87
	0,5993	0,0271	2,47	0,5958	0,0348	3,18	0,5419	0,0416	4,19	0,5257	0,0463	4,80
	0,6149	0,0283	2,51	0,5980	0,0334	3,04	0,5467	0,0413	4,12	0,5265	0,0453	4,69
10	0,5991	0,0286	2,60	0,5796	0,0357	3,36	0,5434	0,0430	4,31	0,5293	0,0481	4,95
	0,6098	0,0290	2,59	0,5872	0,0348	3,23	0,5443	0,0423	4,24	0,5226	0,0473	4,93
	0,6045	0,0306	2,76	0,5896	0,0332	3,07	0,5487	0,0416	4,13	0,5306	0,0476	4,89
20	0,6084	0,0283	2,54	0,5824	0,0335	3,14	0,5395	0,0431	4,36	0,5160	0,0497	5,25
	0,6034	0,0281	2,54	0,5887	0,0350	3,24	0,5425	0,0429	4,31	0,5247	0,0481	5,00
	0,6015	0,0295	2,67	0,5875	0,0343	3,18	0,5392	0,0424	4,29	0,5289	0,0476	4,91
30	0,6018	0,0320	2,90	0,5843	0,0358	3,34	0,5359	0,0433	4,40	0,5161	0,0495	5,23
	0,6121	0,0294	2,62	0,5858	0,0353	3,29	0,5450	0,0444	4,44	0,5258	0,0475	4,93
	0,6169	0,0282	2,49	0,5879	0,0362	3,36	0,5489	0,0425	4,22	0,5323	0,0480	4,92
40	0,5927	0,0284	2,61	0,5804	0,0360	3,38	0,5399	0,0424	4,28	0,5204	0,0483	5,06
	0,6055	0,0281	2,53	0,5860	0,0363	3,38	0,5436	0,0418	4,19	0,5285	0,0474	4,89
	0,6087	0,0282	2,53	0,5869	0,0352	3,27	0,5488	0,0419	4,16	0,5232	0,0482	5,02
50	0,5937	0,0290	2,66	0,5815	0,0365	3,42	0,5388	0,0428	4,33	0,5252	0,0485	5,03
	0,6044	0,0299	2,70	0,5870	0,0353	3,28	0,5411	0,0410	4,13	0,5305	0,0491	5,05
	0,5991	0,0293	2,67	0,5905	0,0348	3,21	0,5451	0,0429	4,29	0,5248	0,0473	4,91
60	0,5939	0,0298	2,74	0,5807	0,0351	3,30	0,5445	0,0428	4,29	0,5200	0,0484	5,07
	0,6062	0,0305	2,74	0,5825	0,0344	3,22	0,5498	0,0435	4,31	0,5269	0,0455	4,71
	0,5972	0,0296	2,70	0,5867	0,0349	3,24	0,5489	0,0430	4,27	0,5282	0,0462	4,77
70	-	-	-	0,5832	0,0358	3,35	0,5433	0,0424	4,25	0,5213	0,0495	5,18
	-	-	-	0,5885	0,0352	3,26	0,5496	0,0417	4,14	0,5255	0,0467	4,84
	-	-	-	0,5846	0,0348	3,25	0,5507	0,0413	4,09	0,5224	0,0480	5,01
80	-	-	-	0,5860	0,0359	3,34	0,5390	0,0434	4,39	0,5158	0,0484	5,12
	-	-	-	0,5859	0,0349	3,25	0,5494	0,0435	4,32	0,5194	0,0498	5,23
	-	-	-	0,5901	0,0341	3,15	0,5516	0,0420	4,15	0,5218	0,0495	5,17
90	-	-	-	0,5887	0,0348	3,22	0,5415	0,0437	4,40	0,5216	0,0481	5,03
	-	-	-	0,5835	0,0359	3,35	0,5461	0,0421	4,20	0,5229	0,0477	4,97
	-	-	-	0,5867	0,0347	3,22	0,5494	0,0437	4,34	0,5258	0,0487	5,05
100	-	-	-	0,5796	0,0353	3,32	0,5409	0,0431	4,34	0,5283	0,0481	4,96
	-	-	-	0,5876	0,0359	3,33	0,5464	0,0416	4,15	0,5256	0,0476	4,94
	-	-	-	0,5880	0,0342	3,17	0,5504	0,0431	4,27	0,5284	0,0470	4,85
110	-	-	-	0,5830	0,0360	3,37	0,5435	0,0430	4,31	0,5279	0,0475	4,91
	-	-	-	0,5768	0,0344	3,25	0,5434	0,0428	4,29	0,5338	0,0481	4,91
	-	-	-	0,5821	0,0340	3,18	0,5452	0,0426	4,26	0,5276	0,0475	4,91
120	-	-	-	0,5847	0,0352	3,28	0,5399	0,0428	4,32	0,5160	0,0462	4,88
	-	-	-	0,5847	0,0338	3,15	0,5437	0,0429	4,30	0,5289	0,0481	4,96
	-	-	-	0,5831	0,0345	3,23	0,5478	0,0423	4,21	0,5284	0,0469	4,84

Tabela A12 – Resistividade elétrica ao longo do tempo para diferentes relações a/c - amostra 2 (CPII-E-40).

Amostra 2, CPII-E-40												
Relação a/c	0,35			0,45			0,55			0,65		
Tempo (min)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)	V _o (V)	V (V)	ρ (Ω .m)
0	0,6171	0,0307	2,71	0,5825	0,0350	3,28	0,5427	0,0414	4,16	0,5222	0,0471	4,92
	0,6144	0,0283	2,51	0,5850	0,0363	3,38	0,5517	0,0403	3,98	0,5263	0,0471	4,88
	0,6188	0,0271	2,39	0,5873	0,0346	3,21	0,5503	0,0412	4,08	0,5327	0,0469	4,80
10	0,6089	0,0274	2,45	0,5809	0,0367	3,44	0,5429	0,0424	4,26	0,5202	0,0486	5,09
	0,6106	0,0300	2,68	0,5830	0,0347	3,24	0,5484	0,0425	4,23	0,5181	0,0491	5,17
	0,6125	0,0273	2,43	0,5873	0,0349	3,24	0,5479	0,0435	4,33	0,5286	0,0491	5,06
20	0,6107	0,0302	2,70	0,5812	0,0365	3,42	0,5432	0,0436	4,38	0,5238	0,0482	5,02
	0,5978	0,0296	2,70	0,5800	0,0352	3,31	0,5427	0,0416	4,18	0,5281	0,0472	4,87
	0,5971	0,0289	2,64	0,5853	0,0347	3,23	0,5476	0,0422	4,20	0,5226	0,0466	4,86
30	0,6016	0,0289	2,62	0,5747	0,0361	3,42	0,5422	0,0420	4,22	0,5202	0,0471	4,94
	0,6035	0,0293	2,65	0,5831	0,0354	3,31	0,5514	0,0420	4,15	0,5246	0,0448	4,66
	0,5892	0,0248	2,29	0,5871	0,0356	3,31	0,5545	0,0410	4,03	0,5286	0,0457	4,71
40	0,6030	0,0272	2,46	0,5788	0,0353	3,32	0,5422	0,0421	4,23	0,5241	0,0468	4,87
	0,5959	0,0287	2,63	0,5853	0,0361	3,36	0,5548	0,0412	4,05	0,5284	0,0473	4,88
	0,6096	0,0302	2,70	0,5856	0,0360	3,35	0,5532	0,0414	4,08	0,5238	0,0471	4,90
50	0,5934	0,0272	2,50	0,5822	0,0362	3,39	0,5440	0,0424	4,25	0,5235	0,0482	5,02
	0,5963	0,0290	2,65	0,5836	0,0352	3,29	0,5443	0,0425	4,26	0,5328	0,0460	4,71
	0,6018	0,0298	2,70	0,5890	0,0353	3,27	0,5461	0,0434	4,33	0,5259	0,0454	4,71
60	0,5959	0,0290	2,65	0,5764	0,0378	3,58	0,5410	0,0408	4,11	0,5209	0,0488	5,11
	0,6013	0,0297	2,69	0,5793	0,0355	3,34	0,5502	0,0416	4,12	0,5241	0,0481	5,00
	0,5974	0,0304	2,77	0,5858	0,0358	3,33	0,5521	0,0407	4,02	0,5247	0,0469	4,87
70	-	-	-	0,5785	0,0349	3,29	0,5400	0,0429	4,33	0,5185	0,0507	5,33
	-	-	-	0,5878	0,0352	3,26	0,5500	0,0428	4,24	0,5209	0,0496	5,19
	-	-	-	0,5857	0,0362	3,37	0,5465	0,0423	4,22	0,5176	0,0478	5,03
80	-	-	-	0,5794	0,0375	3,53	0,5491	0,0418	4,15	0,5193	0,0492	5,17
	-	-	-	0,5817	0,0372	3,49	0,5538	0,0435	4,28	0,5212	0,0470	4,92
	-	-	-	0,5862	0,0360	3,35	0,5505	0,0413	4,09	0,5237	0,0486	5,06
90	-	-	-	0,5797	0,0375	3,53	0,5413	0,0430	4,33	0,5207	0,0491	5,14
	-	-	-	0,5795	0,0370	3,48	0,5474	0,0425	4,23	0,5238	0,0499	5,19
	-	-	-	0,5843	0,0355	3,31	0,5515	0,0419	4,14	0,5266	0,0498	5,16
100	-	-	-	0,5835	0,0371	3,47	0,5462	0,0423	4,22	0,5161	0,0470	4,96
	-	-	-	0,5824	0,0361	3,38	0,5513	0,0418	4,13	0,5275	0,0481	4,97
	-	-	-	0,5882	0,0345	3,20	0,5502	0,0428	4,24	0,5260	0,0486	5,04
110	-	-	-	0,5797	0,0346	3,25	0,5407	0,0435	4,39	0,5215	0,0500	5,23
	-	-	-	0,5823	0,0363	3,40	0,5527	0,0438	4,32	0,5237	0,0481	5,01
	-	-	-	0,5819	0,0362	3,39	0,5489	0,0423	4,20	0,5272	0,0481	4,97
120	-	-	-	0,5834	0,0357	3,34	0,5476	0,0420	4,18	0,5171	0,0504	5,31
	-	-	-	0,5901	0,0354	3,27	0,5420	0,0437	4,40	0,5235	0,0504	5,25
	-	-	-	0,5845	0,0357	3,33	0,5450	0,0432	4,32	0,5282	0,0489	5,05