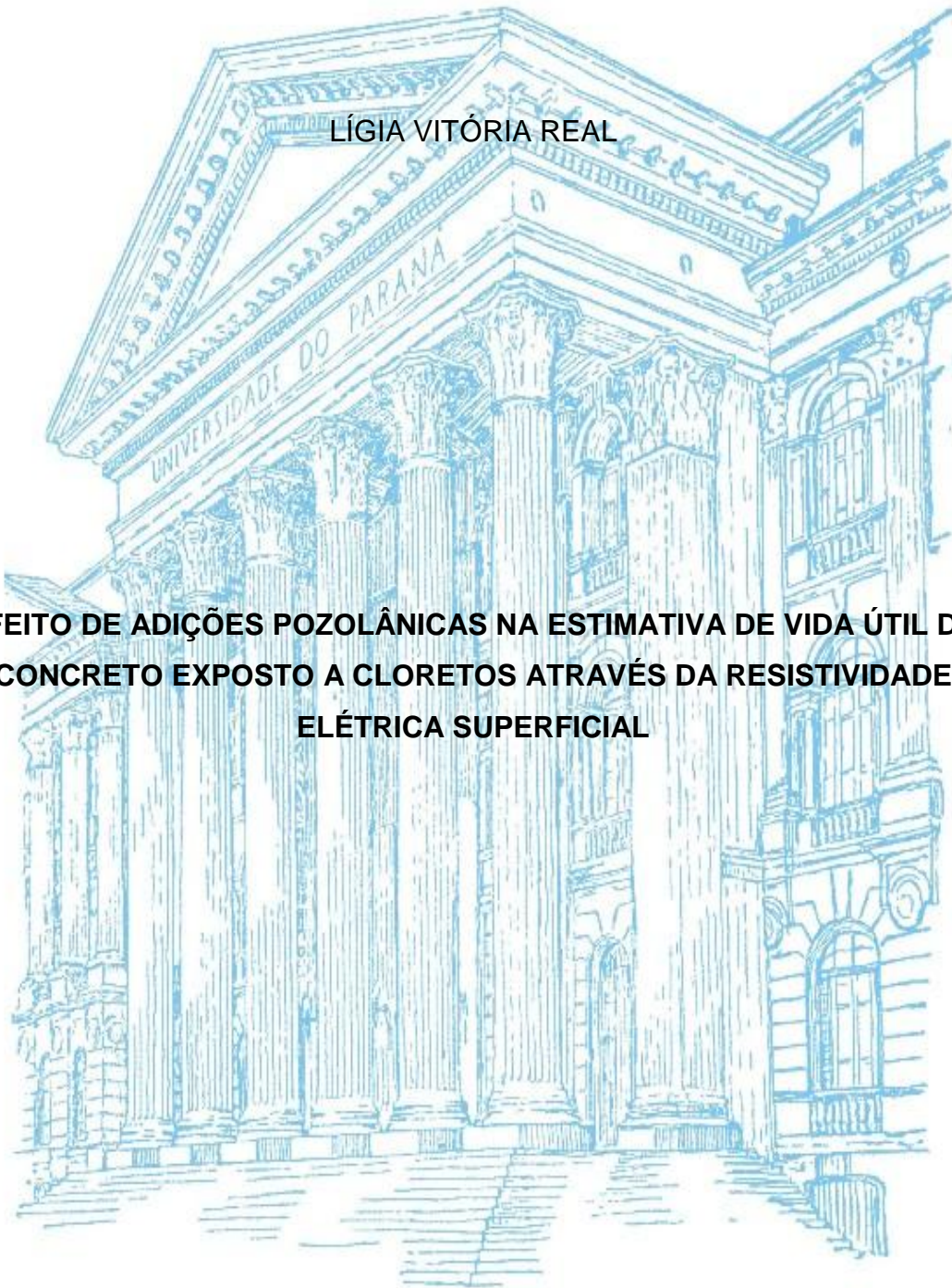


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LÍGIA VITÓRIA REAL

**EFEITO DE ADIÇÕES POZOLÂNICAS NA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DO
CONCRETO EXPOSTO A CLORETOS ATRAVÉS DA RESISTIVIDADE
ELÉTRICA SUPERFICIAL**



CURITIBA

2015

LÍGIA VITÓRIA REAL

**EFEITO DE ADIÇÕES POZOLÂNICAS NA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DO
CONCRETO EXPOSTO A CLORETOS ATRAVÉS DA RESISTIVIDADE
ELÉTRICA SUPERFICIAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Departamento de Construção Civil, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros

CURITIBA

2015

R288e

Real, Lígia Vitória

Efeito de adições pozolânicas na estimativa de vida útil do concreto exposto a cloretos através da resistividade elétrica superficial / Lígia Vitória Real. – Curitiba, 2015.

148 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2015.

Orientador: Marcelo Henrique Farias de Medeiros .

Bibliografia: p. 115-121.

1. Concreto – Deterioração. 2. Concreto armado. 3. Concreto de alta resistência. 4. Resistências de materiais. 5. Cloretos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Medeiros, Marcelo Henrique Farias de. III. Título.

CDD: 624.1834

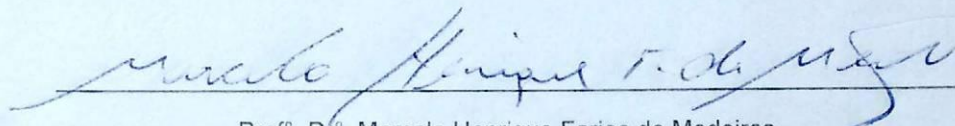
TERMO DE APROVAÇÃO

LÍGIA VITÓRIA REAL

EFEITO DE ADIÇÕES POZOLÂNICAS NA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DO CONCRETO EXPOSTO A CLORETOS ATRAVÉS DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração: Materiais e Estruturas, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

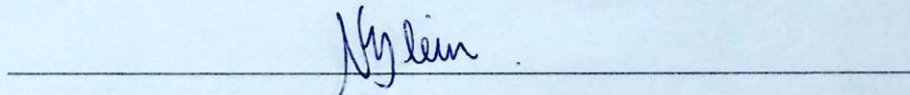
Orientador:



Prof.º, Dr.º, Marcelo Henrique Farias de Medeiros

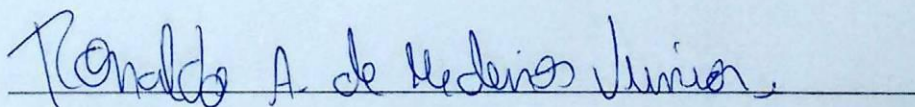
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – UFPR

Examinadores:



Prof.º, Dr.º, Nayara Soares Klein

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – UFPR



Prof.º, Dr.º, Ronaldo Alves de Medeiros Junior

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – UFPR



Prof.º, Dr.º, Paulo Roberto do Lago Helene

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Escola Politécnica da USP

Curitiba, 19 de maio de 2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao apoio incondicional de meus pais Carlos e Eunice. Obrigada pelo constante incentivo e exigências ao longo da vida, ainda que com atitudes subjetivas e demonstrações de carinho subentendidas. “De tudo ao meu amor serei atento. Antes, e com tal zelo, e sempre, e tanto”. Agradeço aos meus irmãos e cunhados, que também fazem parte dessa conquista.

Obrigada, Marlon. Agradeço por todo o amor, compreensão e cuidado. Você fez parte disso tudo, desde o início, e me instiga a ser a melhor versão de mim mesma. Agradeço a você também como profissional, com opiniões e conselhos importantes. Obrigada por estar por perto nesta etapa importante.

Agradeço às minhas amigas Amanda, Cassiana, Camila V. e Camila N. pela torcida, carinho, dedicação e admiração. Vocês são demais.

Obrigada também aos colegas de mestrado e da sala 28, que fizeram toda essa jornada mais leve e simples. Em especial à Carolina e ao Janderson, que se tornaram meus companheiros – quase inseparáveis, em meio a concretos, ensaios e viagens - ao longo desses dois anos.

Não poderia esquecer de todos os alunos de iniciação científica do DURACON. Paulo P., Pedro, Letícia, Paulo C., Luana, Michelle, Pamela e Koffi, sem vocês eu não teria conseguido. Muito obrigada!!! Ricardo e Douglas, técnicos dos laboratórios da UFPR, obrigada por todo auxílio e atenção. Obrigada ao Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho, pelas dicas e ensinamentos. Obrigada ao Eng. Gustavo Macioski, da UTFPR, pelo tempo e auxílio nos ensaios.

Agradeço aos professores avaliadores no exame de defesa. Prof^a. Dra. Nayara Soares Klein, Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior e Prof. Dr. Paulo do Lago Helene, vocês são pessoas que tenho carinho e admiração especial. Os três me inspiram, seja na profissão, seja na área de pesquisa, seja como pessoa. Obrigada!

Por fim, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros. Você me motivou a entrar na área de pesquisa, sendo sempre atencioso e firme. Obrigada por todo incentivo, conhecimento passado e pelas oportunidades oferecidas. Agradeço também pela paciência e tempo dedicado ao meu trabalho. Obrigada, Professor! Meu carinho por você é indescritível.

RESUMO

As maiores densidades demográficas brasileiras ocorrem em torno das áreas litorâneas, o que leva a urbanização e industrialização de uma região onde há forte agressividade às estruturas de concreto, tanto pelo processo de carbonatação quanto pelo ataque por cloretos. Apesar de a NBR 6118 (2014) alertar quanto aos cuidados relativos ao processo construtivo visando a durabilidade, a resistência à compressão ainda é a única propriedade prescrita pela NBR 12655 (2015) para o controle de qualidade do concreto endurecido. Entretanto, nem sempre a avaliação da durabilidade com base apenas nos resultados de resistência mecânica é adequada para a obtenção de concretos duráveis. Além disso, a NBR 15575-1 (2014), atual norma de desempenho, estabelece para as estruturas uma vida útil de projeto mínima de 50 anos. Neste contexto, surge a necessidade de avaliar e modelar as manifestações patológicas do concreto armado. O objetivo desta pesquisa é avaliar a influência do uso das adições pozolânicas cinza volante, metacaulim, sílica ativa e sílica de casca de arroz na vida útil de estruturas de concreto armado calculada segundo Andrade (2004) baseada na resistividade elétrica superficial do concreto para ambientes com a presença de cloretos. Para isso, foram moldados corpos de prova de oito traços diferentes, compostos com CPV-ARI, CPIV, CPII-Z, cinza volante, metacaulim, sílica ativa e sílica de casca de arroz. Realizaram-se ensaios de resistência à compressão, absorção por imersão e absorção por capilaridade para todos os traços citados. Como o modelo de vida útil proposto por Andrade (2004) tem como parâmetros a resistividade elétrica superficial (RES), o fator de reação de cloretos (avaliado pelo coeficiente de difusão de cloretos) e as características do ambiente a que a estrutura é exposta; características que também foram determinadas. Os resultados permitiram observar que há influência direta da composição do traço tanto no fator de idade, quanto na resistividade elétrica superficial. Consequentemente, a vida útil também é alterada. O traço composto com CPII, por exemplo, apresentou um ganho de vida útil por MPa 2,2 vezes superior ao traço de referência, composto com CPV-ARI. O custo por ano de vida para esse traço foi 43% inferior a do traço de referência. Já o traço composto com sílica ativa resultou em uma vida útil por MPa 130% superior, com custo por ano de vida 62% inferior à referência.

Palavras-chave: cloretos, vida útil, modelo, adições pozolânicas, concreto armado, resistividade elétrica superficial

ABSTRACT

The largest Brazilian population densities occur around the coastal areas, which leads to urbanization and industrialization of a region where there is strong aggressiveness to concrete structures, due the carbonation process and the chlorides. Although the NBR 6118 (2014) warns about the care for the constructive process to durability, compressive strength is still the only property prescribed by NBR 12655 (2015) for the quality control of the hardened concrete. However, the results of mechanical strength are not always adequate for obtaining a durable concrete. Furthermore, the NBR 15575-1 (2014), the current standard of structures performance, establishes a project service life of minimum 50 years. In this context, there is a need to evaluate and to model the pathologies of reinforced concrete. The objective of this research is to evaluate the influence of the use of pozzolanic additions fly ash, metakaolin, silica fume and rice-husk ash in the life of reinforced concrete structures calculated according to Andrade (2004) based on the electrical resistivity of concrete for environments with the presence of chlorides. For this, specimens of eight different concretes were molded, compounded of CPV-ARI, CPIV, CPII-Z, fly ash, metakaolin, silica fume and rice-husk ash. Then, compressive strength, absorption by immersion and absorption by capillarity were tested. As the life model proposed by Andrade (2004) has as parameters concrete resistivity, chloride reaction factor (measured by chlorides diffusion coefficient) and the environment characteristics that the structure is exposed, these characteristics were also determined. Results showed that there was a direct influence of the concrete composition both in the factor of age, as the concrete resistivity. Consequently, the service life was also changed. The concrete compounded of CPII, for example, showed a gain of useful life by MPa 2.2 times higher than the mark, made with CPV-ARI. The cost per year of life for this trait was 43% lower than the reference concrete. But the concrete made with silica fume resulted in a lifetime of 130% higher, with cost per year of life 62% lower than the reference concrete.

Key words: chlorides, modeling, service life prediction, pozzolanic, reinforced concrete, concrete resistivity

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIV
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVO	3
1.2. JUSTIFICATIVA.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1. CORROSÃO DO AÇO PRESENTE NO CONCRETO	9
2.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO .	15
2.2.1. Relação água/cimento	18
2.2.2. Agregados	20
2.2.3. Aditivos	21
2.2.4. Cimento e cura.....	22
2.2.5. Adições pozolânicas	23
2.2.6. Geometria da peça	28
2.2.7. Íons cloreto	29
2.3. MODELO DE VIDA ÚTIL DE ANDRADE (2004).....	32
2.3.1. Fator de idade (q)	33
2.3.2. Fator ambiental (k_{cl})	37
2.3.3. Fator de reação de cloretos (r_{cl}).....	39
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	43
3.1. VARIÁVEIS DE ESTUDO	46
3.2. MATERIAIS.....	48
3.2.1. Cimentos.....	48
3.2.2. Adições pozolânicas	49
3.2.3. Agregados	51
3.2.4. Aditivo	53

3.3.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	53
3.3.1.	Massa específica do concreto fresco	54
3.3.2.	Resistência à compressão	55
3.3.3.	Absorção por imersão e porosidade	56
3.3.4.	Absorção por capilaridade	57
3.3.5.	Resistividade elétrica	58
3.3.6.	Migração de cloretos.....	61
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
4.1.	MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO FRESCO.....	65
4.2.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	66
4.3.	ABSORÇÃO POR IMERSÃO E POROSIDADE	69
4.4.	ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE.....	74
4.5.	RESISTIVIDADE ELÉTRICA	76
4.5.1.	EFEITO DAS ADIÇÕES POZOLÂNICAS E CIMENTOS.....	77
4.5.1.	EFEITO DO TEOR DE ADITIVO	84
4.5.2.	EFEITO DO TEOR DE CLORETO	86
4.6.	COEFICIENTE DE DIFUSÃO NO ESTADO NÃO ESTACIONÁRIO.....	89
4.7.	TEMPO DE INICIAÇÃO BASEADO EM ANDRADE (2004).....	98
4.7.1.	Fator de idade (q)	98
4.7.2.	Fator ambiental (k_{CI}).....	103
4.7.3.	Fator de reação de cloretos (r_{CI})	103
4.7.4.	Cálculo do tempo de iniciação	105
4.8.	ANÁLISE DE CUSTOS	108
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	110
5.1.	CONCLUSÕES	110
5.2.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111

5.3.	ATUAÇÃO NA ÁREA DE PUBLICAÇÕES.....	111
5.3.1.	Artigos publicados em eventos	112
5.3.2.	Artigos publicados em revistas	113
5.3.3.	Artigos elaborados e em processo de avaliação.....	113
5.3.4.	Artigo em eventos e em fase de publicação:	114
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
	APÊNDICES.....	122
	APÊNDICE 01 – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO.....	123
	APÊNDICE 02 – TESTE DE TUKEY PARA RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO....	
	124
	APÊNDICE 03 – ABSORÇÃO POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS	126
	APÊNDICE 04 – TESTE DE TUKEY PARA ABSORÇÃO POR IMERSÃO E	
	ÍNDICE DE VAZIOS	127
	APÊNDICE 05 – ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	129
	APÊNDICE 06 – TESTE DE TUKEY PARA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE....	
	133
	APÊNDICE 07 – RESISTIVIDADES ELÉTRICAS PARA DIFERENTES ADIÇÕES	
	E TIPOS DE CIMENTO.....	134
	APÊNDICE 08 – TESTES DE TUKEY PARA RESISTIVIDADES ELÉTRICAS	
	COM DIFERENTES ADIÇÕES E TIPOS DE CIMENTO.....	136
	APÊNDICE 09 – RESISTIVIDADES ELÉTRICAS PARA DIFERENTES TEORES	
	DE ADITIVO	140
	APÊNDICE 10 – RESISTIVIDADES ELÉTRICAS PARA DIFERENTES TEORES	
	DE CLORETO	142
	APÊNDICE 11 – TESTE DE TUKEY PARA RESISTIVIDADES ELÉTRICAS COM	
	DIFERENTES TEORES DE CLORETO.....	143
	APÊNDICE 12 – RESULTADOS DO ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS	
	NO ESTADO NÃO ESTACIONÁRIO	144

APÊNDICE 13 – TESTE DE TUKEY PARA COEFICIENTES DE DIFUSÃO NO ESTADO NÃO ESTACIONÁRIO.....	148
---	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resistividades elétricas mensuradas para concreto com e sem adição de cinza volante	3
Figura 2 – Regra de Sitter correlacionando custos de intervenção com as etapas da corrosão	5
Figura 3 – Produção de cimento no Brasil de 1970 a 2012.....	6
Figura 4 – Técnicas utilizadas em estudos de corrosão por penetração de íons cloreto no Brasil.....	7
Figura 5 – Esquema do mecanismo de corrosão do aço no concreto.....	10
Figura 6 – Produtos formados na reação de corrosão do aço	10
Figura 7 - Esquema do ensaio de quatro pontos para medir resistividade.....	16
Figura 8 – Condução iônica no sistema de poros de pasta de cimento endurecida	18
Figura 9- Influência da relação água/cimento e do consumo de cimento na RES do concreto.....	19
Figura 10 – Resistividade elétrica superficial x relação água/cimento para CP III – RS 40	20
Figura 11 – Valores de resistividade elétrica do concreto para diferentes tipos de cimento.....	23
Figura 12 – Classificação de adições minerais para concreto.....	24
Figura 13 - Efeito da cinza volante na resistividade elétrica do concreto	25
Figura 14 - Efeito da cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto	26
Figura 15 - Influência da sílica ativa e cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto	27
Figura 16 - Influência da sílica ativa e na resistividade elétrica do concreto	28
Figura 17 – Recomendações de parâmetros geométricos para ensaio com eletrodo de Wenner.....	29
Figura 18 – Influência da adição de cloretos na resistividade elétrica do concreto	31
Figura 19 – Exemplo de como definir o fator de idade “q”	34
Figura 20 – Fissura presente nos corpos de prova dos traços com sílica ativa ...	42

Figura 21 – Esquema do estudo principal	45
Figura 22 – Produção de cimento no Brasil de 2007 a 2012.....	48
Figura 23 - Difratogramas das adições minerais pozolânicas	51
Figura 24 – Granulometria agregado miúdo.....	52
Figura 25 - Granulometria agregado graúdo	52
Figura 26 – Esquema temporal dos ensaios realizados	53
Figura 27 – Corpos de prova recém moldados	55
Figura 28 – Ruptura dos corpos de prova	56
Figura 29 – Corpos de prova esfriando no dessecador e pesagem das amostras submersas.....	56
Figura 30 – Ensaio de absorção por capilaridade	58
Figura 31 – Formas para moldagem dos corpos de prova para avaliação da resistividade elétrica.....	59
Figura 32 – Corpos de prova cúbicos para avaliar a resistividade elétrica.....	59
Figura 33 – Aplicação do eletrodo de Wenner	60
Figura 34 - Esquema da extração de amostras para o ensaio de migração de cloretos.....	61
Figura 35 – Processo de saturação das fatias de concreto para o ensaio de migração.....	61
Figura 36 – Células do ensaio de migração de cloretos.....	62
Figura 37 – Ensaio de migração de cloretos	63
Figura 38 – Ruptura ao meio das fatias do ensaio de migração	63
Figura 39 - Precipitação branca de cloretos livres e região livre de cloretos em marrom.....	64
Figura 40 – Indicação da região com cloretos livres para os traços ensaiados ...	64
Figura 41 – Resultados médios de resistência à compressão	66
Figura 42 - Resultados médios de absorção por imersão	69
Figura 43 – Correlação entre resistência à compressão e absorção por imersão	70
Figura 44 – Resultados médios dos índices de vazios.....	71
Figura 45 - Correlação entre resistência à compressão e índice de vazios	72
Figura 46 – Resultados médios de absorção por capilaridade.....	74
Figura 47 - Correlação entre absorção por capilaridade e absorção por imersão	75

Figura 48 – Correlação entre resistência à compressão e absorção por capilaridade	76
Figura 49 - Resultados médios de resistividade elétrica superficial para diferentes adições e tipos de cimento	78
Figura 50 – Correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão..	82
Figura 51 – Correlação entre resistividade elétrica e índice de vazios.....	83
Figura 52 – Correlação entre resistividade elétrica e absorção por imersão.....	83
Figura 53 - Correlação entre resistividade elétrica e absorção por capilaridade .	83
Figura 54 – Resultados médios de resistividade elétrica superficial para diferentes teores de aditivo	84
Figura 55 – Correlação entre teor de aditivos e resistividade elétrica superficial .	85
Figura 56 – Resultados médios de resistividade elétrica superficial para diferentes teores de cloreto.....	86
Figura 57 – Correlação entre teor de cloreto e resistividade elétrica considerando 0% de cloretos.....	88
Figura 58 - Correlação entre teor de cloreto e resistividade elétrica não considerando 0% de cloretos	89
Figura 59 – Corrente passante média no ensaio de migração	90
Figura 60 – Carga média acumulada no ensaio de migração	91
Figura 61 – Coeficientes de difusão médios no estado estacionário.....	92
Figura 62 – Correlação entre carga acumulada e coeficiente de difusão.....	94
Figura 63- Correlação entre resistividade elétrica e coeficiente de difusão	94
Figura 64 - Correlação entre resistividade elétrica e carga acumulada.....	95
Figura 65 - Correlação entre resistividade elétrica e corrente passante	95
Figura 66 – Resistividades elétricas medidas e calculadas	96
Figura 67 – Correlação entre resistividade elétrica calculada e medida	97
Figura 68 – Determinação do fator de idade “q”	98
Figura 69 – Fatores de idade “q” por traço	99
Figura 70 - Tempo de vida útil para Classe de Agressividade III	106
Figura 71 - Tempo de vida útil para Classe de Agressividade IV	106
Figura 72 – Ano de vida ganho por MPa para $k_{Cl} = 2500$	108
Figura 73 – Custo absoluto dos concretos	109
Figura 74 – Custo por MPa	109

Figura 75 – Custo por ano de vida 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teores críticos de cloretos admitidos por diversas normas e recomendações.....	13
Tabela 2 – Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto	14
Tabela 3 - Probabilidade de corrosão conforme resistividade elétrica do concreto	17
Tabela 4 – Resistividade elétrica de rochas.....	20
Tabela 5 – Traços de Santos (2006)	30
Tabela 6 – Valores de q para diferentes tipos de cimento europeus.....	35
Tabela 7 – Valores de q para concretos com sílica ativa e pozolana.....	36
Tabela 8 – Valores de q para diferentes tipos de cimento brasileiros e relações água/cimento.....	36
Tabela 9 - Valores de k_{Cl} para diferentes tipos classes de agressividade.....	37
Tabela 10 – Valores de k_{Cl} para traços com CII-F e adição de sílica ativa	38
Tabela 11- Valores recomendados para r_{Cl}	40
Tabela 12 – Fatores de reação de cloreto para cimentos brasileiros	41
Tabela 13 - Fatores de reação de cloreto para cimento CII-F e sílica ativa.....	41
Tabela 14 – Comparativo entre fatores de reação de cloreto.....	42
Tabela 15 – Traços unitários em massa	43
Tabela 16 – Classe de agressividade e parâmetros para garantia da qualidade do concreto	44
Tabela 17 – Traços para avaliação da influência do teor de cloretos na RES	46
Tabela 18 – Características físicas dos cimentos	49
Tabela 19 – Características químicas dos cimentos	49
Tabela 20 – Características físicas e atividade pozolânica das adições empregadas	49
Tabela 21 – Análise química por fluorescência de raios X das adições minerais	50
Tabela 22 – Características da areia natural.....	51
Tabela 23 – Características da brita 1.....	52
Tabela 24 – Quantidade, dimensões e moldagem das amostras.....	54

Tabela 25 – Fatores de forma para diferentes tamanhos de amostras e distâncias entre eletrodos	58
Tabela 26 – Resultado das massas específicas e consumos de cimento.....	65
Tabela 27 – Análise de variância (ANOVA) para resistências à compressão	67
Tabela 28 - Análise de variância (ANOVA) para absorção por imersão.....	69
Tabela 29 - Análise de variância (ANOVA) para índice de vazios.....	71
Tabela 30 - Análise de variância (ANOVA) para absorção por capilaridade	75
Tabela 31 - Análise de variância (ANOVA) para resistividade elétrica superficial para diferentes adições e tipos de cimento	79
Tabela 32 - Análise de variância (ANOVA) para resistividade elétrica superficial para diferentes teores de aditivo	85
Tabela 33 - Análise de variância (ANOVA) para resistividade elétrica superficial para diferentes teores de cloreto.....	87
Tabela 34 - Análise de variância (ANOVA) coeficientes de difusão no estado estacionário.....	93
Tabela 35 - Análise de variância (ANOVA) para resistividades elétricas medidas e calculadas	97
Tabela 36 – Comparação entre fatores de idade q	102
Tabela 37 – Classes de agressividade ambiental, fatores ambientais e cobrimentos.....	103
Tabela 38 – Fatores de reação de cloretos adotados	104
Tabela 39 – Resultados de resistência à compressão sem eliminação dos dados espúrios.....	123
Tabela 40 - Resultados de resistência à compressão com eliminação dos dados espúrios.....	123
Tabela 41 – Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para resistências à compressão aos 28 dias.....	124
Tabela 42 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para resistências à compressão aos 56 dias.....	125
Tabela 43 - Resultados de absorção por imersão e índice de vazios	126
Tabela 44 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para absorção por imersão	127

Tabela 45 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para índice de vazios	128
Tabela 46 - Absorção por capilaridade sem eliminação dos dados espúrios	129
Tabela 47 - Absorção por capilaridade com eliminação dos dados espúrios	131
Tabela 48 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para absorção por capilaridade	133
Tabela 49 – Resistividade elétricas para diferentes adições e tipos de cimento	134
Tabela 50 – Médias, desvios padrão e coeficientes de variação para as resistividades elétricas com diferentes adições e tipos de cimento	134
Tabela 51 – Resistividades elétricas após eliminação de dados espúrios – cimentos e adições pozolânicas	135
Tabela 52 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para resistividade elétrica aos 7 dias	136
Tabela 53 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para resistividade elétrica aos 28 dias	137
Tabela 54 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para resistividade elétrica aos 56 dias	138
Tabela 55 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para resistividade elétrica aos 91 dias	139
Tabela 56 – Resistividade elétricas para diferentes teores de aditivo	140
Tabela 57 – Resistividades elétricas após eliminação de dados espúrios - aditivo	141
Tabela 58 - Resistividade elétricas para diferentes teores de cloreto	142
Tabela 59 – Resistividades elétricas após eliminação de dados espúrios - cloretos	142
Tabela 60 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para resistividade elétrica com adição de cloretos	143
Tabela 61 – Corrente passante média ao longo do tempo e por traço	144
Tabela 62 – Carga acumulada média ao longo do tempo e por traço	145
Tabela 63 – Coeficientes de difusão no estado não estacionário (aparente)	146
Tabela 64 - Coeficiente de difusão no estado não estacionário para o traço TM após eliminação de dados espúrios	146
Tabela 65 – Profundidade de penetração de cloretos no ensaio de migração ...	147

Tabela 66 - Teste de Tukey para coeficientes de difusão	148
---	-----

1. INTRODUÇÃO

As maiores densidades demográficas brasileiras, acima de 100 habitantes/km², ocorrem em torno das áreas litorâneas (IBGE, 2010). Isso leva a urbanização e industrialização de uma região onde há forte agressividade às estruturas de concreto (NBR 6118, 2014), tanto pelo processo de carbonatação quanto pelo ataque por cloretos.

Apesar de a NBR 6118 (2014) alertar quanto aos cuidados necessários com drenagem, formas arquitetônicas e estruturais, limitar a abertura de fissuras e prescrever cobrimentos, classes de resistência e relações água/cimento conforme a agressividade ambiental, a resistência à compressão ainda é a única propriedade prescrita por norma para o controle de qualidade do concreto endurecido (NBR 12655, 2015). Entretanto, nem sempre a avaliação da durabilidade com base apenas nos resultados de resistência mecânica é adequada para a obtenção de concretos duráveis (HOPPE FILHO *et al.*, 2013; MEDEIROS JR. *et al.*, 2014).

A durabilidade é resultado da interação da estrutura de concreto, do ambiente e das condições de uso, de operação e de manutenção. Não é uma propriedade intrínseca a estrutura ou ao concreto (MEDEIROS *et al.*, 2011). Para que seja garantida, requer-se cooperação e atitudes coordenadas de todos os envolvidos nos processos de projeto, construção e utilização (NBR 6118, 2014).

A atual norma de desempenho estabelece para estruturas uma vida útil de projeto (VUP) mínima de 50 anos. A vida útil (VU) é a composição do valor teórico calculado para vida útil de projeto influenciado, positiva ou negativamente, pelas ações de manutenção, intempéries e outros fatores fora do controle do usuário. A VU consiste no período de tempo compreendido entre o início de operação ou uso de um produto da construção civil e o momento em que seu desempenho deixa de atender aos requisitos preestabelecidos (NBR 15575-1, 2014).

Contudo, os projetistas, construtores e incorporadores são responsáveis apenas pelos valores teóricos de VUP, pois, segundo a NBR 15575-1 (2014), estes profissionais não podem prever, estimar ou se responsabilizar pelo valor real de vida útil atingido, uma vez que este depende de fatores fora de seus

controles, tais como: correto uso e operação do edifício, constância nas manutenções, alterações climáticas, níveis de poluição local e mudanças no entorno das construções (como rebaixamento do nível do lençol freático ou obras de infraestrutura, por exemplo).

Apesar de existirem propostas de modelagem dos mecanismos de ataque dos agentes agressivos ao concreto (ANDRADE, 2001; ANDRADE *et al.*, 2006), a efetiva incorporação nas normas ainda é lenta, também porque existe uma controvérsia mundial sobre qual é a melhor abordagem de estimativa de vida útil (ANDRADE *et al.*, 2009; ANDRADE, 2014). Neste contexto, surge a necessidade de avaliar, quantificar e modelar as manifestações patológicas do concreto armado, de modo a entender melhor os processos de degradação e propor aperfeiçoamentos nos modelos existentes, ou mesmo propor novos meios de estimar a vida útil.

Este trabalho está focado na técnica não destrutiva denominada Resistividade Elétrica Superficial (RES) que pode ser utilizada para o controle da qualidade de peças pré-fabricadas (ANDRADE, 2014) e também para modelagem da vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão por penetração de íons cloreto (MEDEIROS JR., 2014; ANDRADE & D'ANDREA, 2010; ANDRADE, 2004).

A RES é uma característica dos materiais em geral; consiste no inverso da condutividade (LEOCINI & LIMA, 2010) e indica a habilidade de transporte de cargas elétricas do material avaliado (ANDRADE *et al.*, 2009). É um ensaio não destrutivo e de fácil execução, que permite contínuo monitoramento da qualidade do concreto, sem comprometer a integridade física da estrutura (MEDEIROS JR., 2014).

O modelo de vida útil baseado na Resistividade Elétrica Superficial (RES) do concreto proposto por Andrade (2004) tem como parâmetros a RES do concreto saturado, a porosidade, a capacidade de combinação de cloretos do concreto em avaliação e as características do ambiente a que a estrutura será exposta.

A reação pozolânica, que ocorre quando há presença de determinadas adições no concreto, consome o hidróxido de cálcio remanescente da hidratação do cimento, formando géis C-S-H. Além de melhorar a durabilidade frente a

muitos meios agressivos, o produto da reação pozolânica é eficiente no preenchimento de vazios capilares, aumentando a resistência e a impermeabilidade da pasta endurecida (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Hoppe Filho *et al.* (2013) encontraram valores de resistividade até seis vezes maiores para concreto com adição de cinza volante se comparado ao traço referência, sem adições minerais. É possível observar na Figura 1 que enquanto o concreto de cimento CPV - ARI foi considerado, de acordo com os limites do CEB 192 (1989), com alta probabilidade de corrosão, os concretos com adição de cinza volante foram classificados na faixa “negligenciável”.

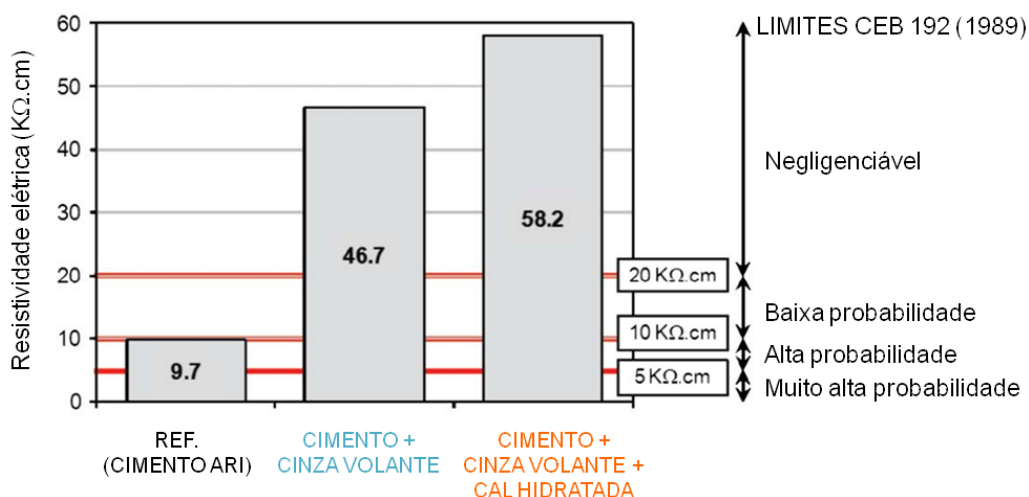


Figura 1 – Resistividades elétricas mensuradas para concreto com e sem adição de cinza volante
Fonte: Traduzido de Hoppe Filho *et al.* (2013)

Portanto, considerando que as adições pozolânicas alteraram propriedades do concreto, tais como a estrutura de poros da pasta e a resistividade elétrica superficial, a pergunta que inspira o desenvolvimento deste trabalho é: qual é a influência do uso de adições pozolânicas na modelagem da vida útil baseada em Andrade (2004)?

1.1. OBJETIVO

Esta dissertação tem como objetivo avaliar a influência do uso das adições pozolânicas cinza volante, metacaulim, sílica ativa e sílica de casca de

arroz na vida útil de estruturas de concreto armado calculada segundo Andrade (2004), baseada na resistividade elétrica superficial do concreto.

1.2. JUSTIFICATIVA

A corrosão de armadura é um grande problema mundial, especialmente em pontes, túneis, estruturas offshore e construções expostas a ambientes agressivos (água do mar ou saís de degelo). Como resultado, têm-se altas despesas com recuperação e reparo dessas estruturas (LOUNIS, 2010; RINCÓN, 2006). Esses valores podem ser quantificados através da análise dos custos diretos e indiretos. Os diretos são atribuídos aos proprietários ou operadores das estruturas, fabricantes de produtos e fornecedores de serviços. São relativos à seleção de materiais, realização de inspeções, manutenções e reparos. Os indiretos não são pagos pelos donos; relacionam-se com o impacto ambiental, preservação de monumentos e edificações, segurança e bem estar das pessoas e sustentabilidade de recursos naturais (ABRACO, 2014).

De acordo com um estudo realizado de 1999 a 2001 nos EUA, os custos diretos estimados com a corrosão foram iguais a 3,1% do PIB (Produto Interno Bruto) do país (DTCPM, 2014). Tal valor está de acordo com o indicado por Baboian (2010), que afirmam que os gastos na prevenção da corrosão e na manutenção ou substituição de produtos perdidos ou contaminados devido à corrosão podem chegar a 5% da receita de uma nação industrializada, sendo que os valores mais aceitos estão entre 3,5 e 4%.

No Brasil, as intervenções em estruturas de concreto armado normalmente são realizadas quando já há um processo avançado de corrosão, elevando as despesas para a reabilitação, a ponto de os gastos governamentais chegarem a R\$ 800 milhões por ano apenas com estruturas danificadas devido ao ataque por cloretos (DOTTO, 2012).

O processo de corrosão de armaduras no concreto armado se divide em duas etapas: iniciação e propagação. A primeira relaciona-se a termodinâmica da reação, ou seja, se existem ou não as condições necessárias para que a corrosão ocorra. A segunda está associada à cinética do processo, determinando a taxa

(velocidade) de corrosão (HELENE, 1993). Os gastos com intervenções de armaduras corroídas podem ser relacionados às etapas de iniciação e propagação e aumentam de maneira progressiva, seguindo a Regra de Sitter, conforme o momento em que as atitudes são tomadas (Figura 2). Caso os reparos ou recuperações sejam realizados no fim do período de iniciação, os custos serão 25 vezes maiores do que se adequadas práticas construtivas tivessem sido adotadas durante a execução da obra. Se a corrosão já estiver em seu processo de propagação, as despesas serão multiplicadas por 125 (RIBEIRO, 2014).

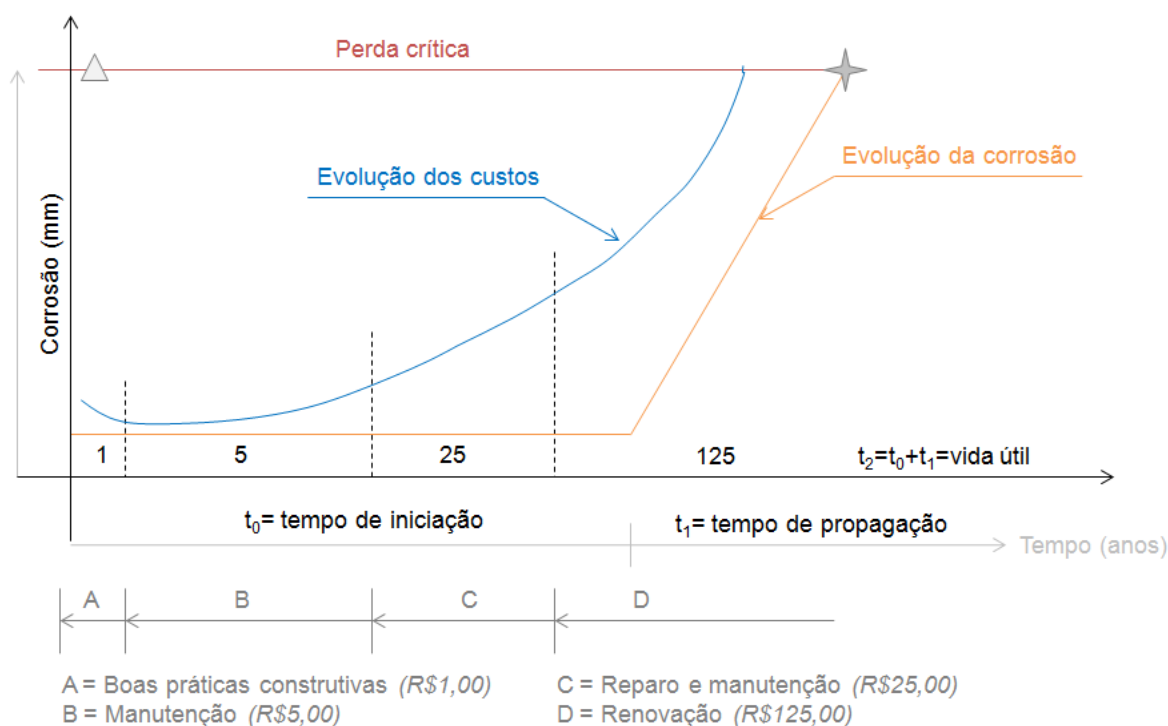


Figura 2 – Regra de Sitter correlacionando custos de intervenção com as etapas da corrosão
 Fonte: Adaptado de Ribeiro (2014)

O crescimento dos custos envolvendo a manutenção de estruturas alerta os engenheiros e responsáveis pelas construções a darem mais atenção às questões de durabilidade. Além disso, a conservação de recursos naturais através do uso de materiais de construção duradouros é uma atitude ecológica (MEHTA & MONTEIRO, 2008). A redução na durabilidade das construções associa-se ao aumento dos gastos com reparos, renovação e manutenção. Caso a vida útil seja planejada desde o projeto, esses valores podem ser atenuados. Assim, há

também a preservação de recursos naturais, redução de impactos e economia de energia (RIBEIRO, 2014).

A construção civil brasileira encontra-se em ascensão desde 2004. Como pode ser observado na Figura 3, a produção nacional de cimento aumentou 32,8 milhões de toneladas em 8 anos. Isso representa um crescimento de 91% no consumo de cimento. As vendas acumuladas no período entre junho/2013 e maio/2014 foram iguais a 70,7 milhões de toneladas. Se comparadas ao mesmo período do ano anterior, apresentaram uma expansão de 3,1%. Entre janeiro e maio de 2014, o consumo nacional de cimento foi 2,8% superior a 2013, chegando a 28,8 milhões de toneladas (SNIC, 2013).

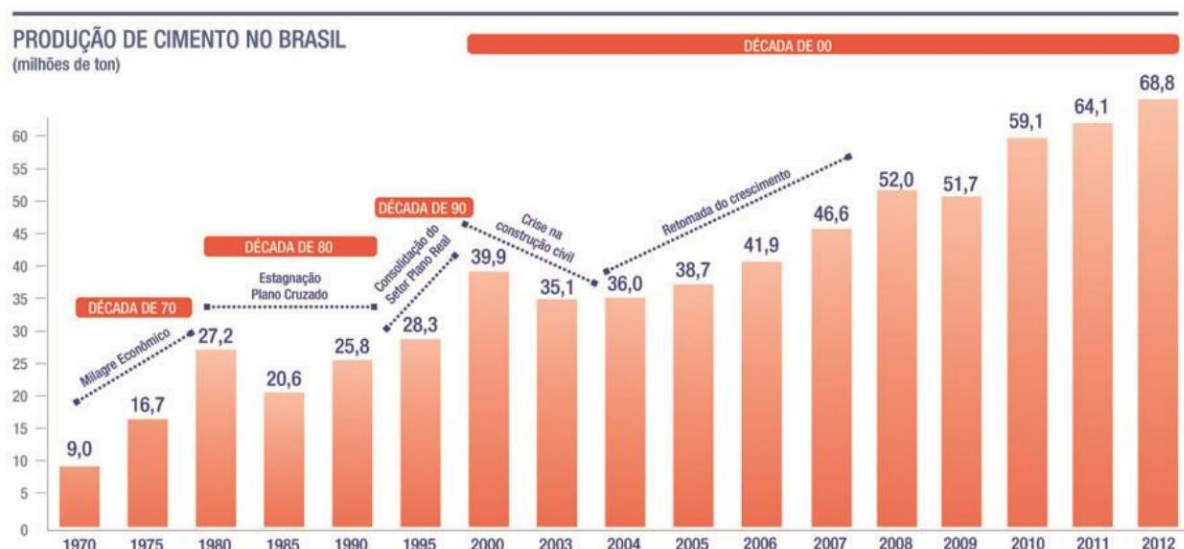


Figura 3 – Produção de cimento no Brasil de 1970 a 2012

Fonte: SNIC (2013)

Segundo o Inventário Nacional dos Gases do Efeito Estufa do Ministério da Ciência e Tecnologia do Brasil (2010), de 1990 a 2005, para cada tonelada de cimento produzido foram emitidos em média $0,40 \pm 0,02$ toneladas de gás carbônico apenas considerando o processo de descarbonatação do calcário na produção do clínquer. Ao se adicionar a energia gasta, tem-se uma emissão 0,60 toneladas de CO_2 para cada tonelada de cimento produzida. Apesar de, devido à modernização das fábricas brasileiras, este valor está abaixo da média mundial ($0,90 \text{ t CO}_2/\text{t cimento}$), considerando a produção anual e a emissão nacional de CO_2 entre 1970 e 2010, a fabricação de cimento foi responsável por $7,2 \pm 0,9\%$ da emissão de gás carbônico brasileira.

O uso de adições minerais em substituição ao cimento propicia a redução das emissões de CO₂, uma vez que diminui a produção de clínquer e, conseqüentemente, a queima de combustíveis e a emissão por calcinação (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO BRASIL, 2010).

Torres (2011) realizou uma meta-análise dos estudos relacionados com a corrosão por cloretos em estruturas de concreto e mostrou que 19% dos trabalhos realizados no Brasil avaliaram a resistividade elétrica do concreto. Esse foi o terceiro ensaio mais utilizado nas atuais investigações sobre corrosão causada pela contaminação por íons cloreto (Figura 4). Assim, pode-se considerar que a avaliação da resistividade elétrica é conhecida e disseminada no país e, portanto, um modelo de vida útil baseado na resistividade elétrica do concreto para estruturas contaminadas por cloretos (ANDRADE, 2004) poderia ser aplicado com relativa facilidade para o controle da durabilidade.

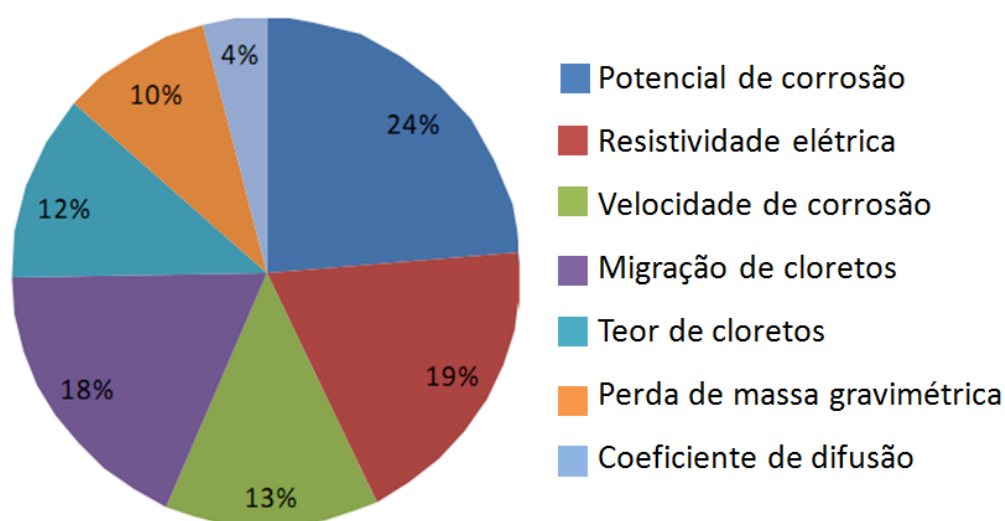


Figura 4 – Técnicas utilizadas em estudos de corrosão por penetração de íons cloreto no Brasil
Fonte: Adaptado de Torres (2011)

É neste pano de fundo que este trabalho está inserido, com foco na aplicação da técnica de resistividade elétrica superficial para viabilizar estimativas de vida útil nas condições nacionais. O intuito é possibilitar uma evolução na especificação de materiais para estruturas de concreto armado, baseando-se no efeito que eles possam ter na durabilidade do sistema estrutural quando há exposição aos íons cloretos. Em resumo, a importância deste trabalho em questão é evidenciar e ilustrar um meio de estimativa de vida útil de estruturas de

concreto armado em condições de exposição a íons cloretos, evidenciando o efeito das adições minerais neste tipo de sistema estrutural.

Otimizando a especificação baseado em vida útil, produz-se uma contribuição a sustentabilidade uma vez que o concreto passa a ser dosado com as propriedades necessárias ao cumprimento das suas funções, sem superdimensionamento e, muitas vezes, com ganho de durabilidade e substituição parcial de clínquer por adições minerais apropriadas ao caso de exposição aos cloretos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo estão apresentados os principais conceitos relacionados a corrosão do aço presente no concreto na presença de íons cloreto, sobre resistividade elétrica superficial e modelagem de vida útil segundo Andrade (2004).

2.1. CORROSÃO DO AÇO PRESENTE NO CONCRETO

A corrosão do aço presente no concreto é um fenômeno eletroquímico, caracterizado pela formação de pilhas de corrosão e deslocamento de elétrons através de um eletrólito. Assim, para que ocorra o processo corrosivo é necessário que haja (HELENE, 1993):

- **Diferença de potencial (ddp)**, que induz o fluxo de elétrons. No concreto, pode ser gerada pela existência de: correntes de fuga; diferenças de umidade; concentrações salinas diferenciais; aeração diferencial; tensão diferencial; temperatura diferencial; heterogeneidades no concreto e no aço.
- **Eletrólito**, que possibilita o transporte de elétrons da região anódica para a catódica. É caracterizado pela solução presente nos poros do concreto.
- **Oxigênio**, que faz parte das reações de redução da pilha de corrosão.

Na presença de água, o aço perde energia até se equilibrar com o meio aquoso através da ionização do metal na forma de cátions. Como pode ser observado na Figura 5, os elétrons perdidos pelo ferro na região anódica (que sofre a corrosão) se movimentam através do eletrólito para a região catódica e, em meios alcalinos aerados, permitem que a reação de redução do oxigênio ocorra, formando OH^- (HELENE, 1993; DOTTO, 2006).

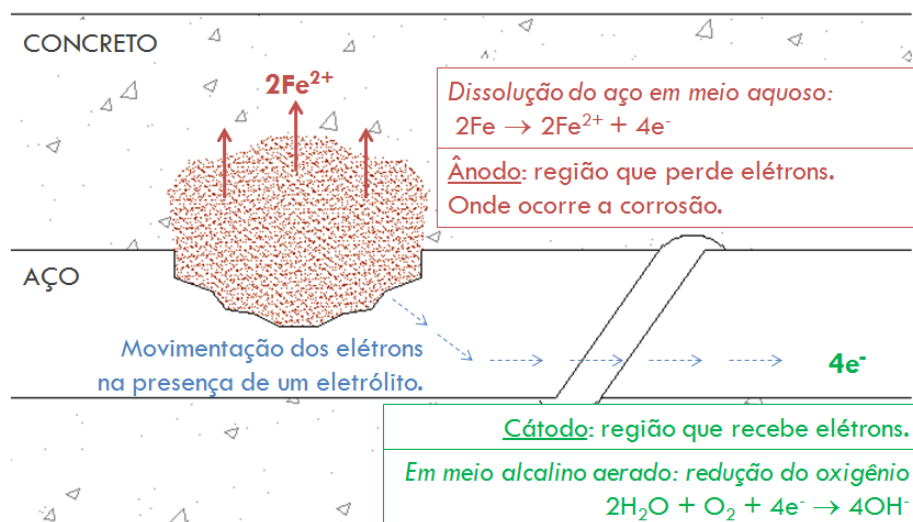


Figura 5 – Esquema do mecanismo de corrosão do aço no concreto
 Fonte: Baseado em Helene (1993) e Dotto (2006)

Esses íons hidroxila, por sua vez, reagem com os íons ferro em solução, formando os produtos da corrosão, que são depositados na região anódica. Além de isso levar a perda de aderência e de seção das barras de aço, o volume dos óxidos formados é superior ao do ferro original (Figura 6). Assim, quando a tensão gerada pela expansão dos produtos da corrosão do aço ultrapassa a resistência à tração do concreto, há o aparecimento de fissuras, podendo inclusive levar ao deslocamento do concreto (CASCUDO, 1997; DOTTO, 2006).

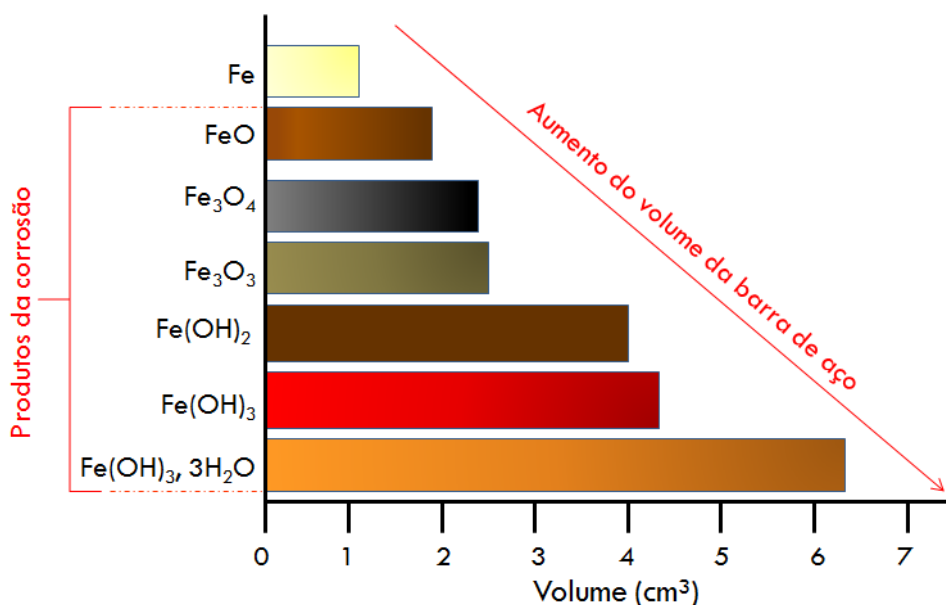
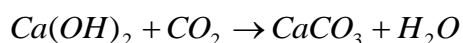


Figura 6 – Produtos formados na reação de corrosão do aço
 Fonte: Adaptado de Cascudo (1997)

Deve-se salientar que a corrosão eletroquímica não ocorre em ambientes secos ou submersos. No primeiro caso, não acontece por não haver eletrólito que permitiria a movimentação dos elétrons e a consequente reação de redução do oxigênio. No segundo, não ocorre porque a partir de 1,50 m de coluna d'água, a pressão hidrostática é suficiente para impedir a difusão do oxigênio. Assim, não há nem entrada de O₂ no concreto e nem a formação de íons hidroxila que reagiriam com os íons ferro e formariam os produtos acima expostos (HELENE, 1993; ANGST & VENNESLAND, 2009).

Em condições normais, o concreto protege o aço atuando tanto como uma barreira física, impedindo o contato do metal diretamente com o meio externo, quanto química, devido ao pH elevado (em torno de 12,5) que possibilita a formação de uma película passivadora que envolve a armadura. A composição deste filme protetor ainda é objeto de discussão, mas a teoria mais aceita é que a película seja formada por duas camadas: uma mais interna, composta principalmente de magnetita e outra mais externa, composta por óxidos férricos. O aço se torna vulnerável a corrosão quando há perda da estabilidade dessa camada protetora, causada pelo fenômeno da carbonatação ou pela presença de íons cloreto (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997; HOPPE, 2005; FIGUEIREDO & MEIRA, 2011).

A carbonatação consiste, basicamente, na reação do dióxido de carbono, proveniente do ar ou de águas agressivas, com o hidróxido de cálcio resultante da reação de hidratação do cimento, formando carbonato de cálcio, composto que leva a redução do pH da solução aquosa para 8,5-9 (Equação 1). Outras substâncias como o NaOH ou KOH também podem reagir de forma semelhante, diminuindo o pH (GENTIL, 1996 *apud* ABREU, 1998).



Equação 1

Esse processo se caracteriza principalmente pela formação de uma frente de avanço, conhecida como “frente de carbonatação”, que separa duas zonas com pH diferentes; a região não contaminada, de pH > 12 e a região carbonatada, de pH < 9. Quando essa “frente de carbonatação” atinge à armadura, a camada

de passivação que envolve o aço é desestabilizada e o metal fica suscetível à corrosão eletroquímica (HOPPE, 2005; CASCUDO & CARASAK, 2011).

Já os íons cloreto atuam por mecanismo diferente; causam a corrosão por reação direta com a armadura, independente do pH do concreto. Esses íons podem provir de fontes internas, como por exemplo, do uso de agregados ou água contaminados com sais ou do uso de aditivos aceleradores de pega que contém cloreto de cálcio (amplamente utilizados até meados de 1970) ou de fontes externas, devido à penetração, migração e difusão no concreto endurecido quando há contato direto com a água do mar, presença de maresia, sais de degelo ou em estruturas que armazenem sal, como tanques de salmoura e aquários (CASCUDO, 1997; BROMMFIELD, 2007; FIGUEIREDO, 2011).

Esses íons podem ser encontrados na matriz cimentícia de três formas: adsorvidos na superfície dos poros capilares, livres (dissolvidos na água dos poros) ou combinados com o C_3A e C_4AF (produtos da hidratação do cimento) formando cloroaluminatos, também conhecidos como Sal de Friedel ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$). Os realmente nocivos são os livres, por estarem disponíveis para reagir com as armaduras do concreto (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997; PEREIRA & CINCOTTO, 2001).

Esses íons livres corroem pontualmente as armaduras do concreto, provocando a corrosão por pite (em pontos localizados). Esses pontos formam o ânodo da pilha de corrosão e, devido à sua progressão em profundidade, podem provocar a ruptura da barra de aço (HELENE, 1993; FRANÇA, 2011).

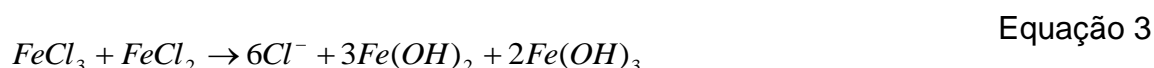
Segundo o ACI 222 existem três teorias que explicam o fenômeno de despassivação e corrosão das armaduras por meio dos íons cloretos (HELENE, 1993; SIQUEIRA, 2008; FIGUEIREDO & MEIRA, 2011):

- **Teoria do filme de óxido:** os íons cloretos penetram muito mais facilmente nas deformidades da película passivante do que os outros íons agressivos, como os sulfatos por exemplo, e podem se dispersar coloidalmente nessa película;
- **Teoria da adsorção:** os íons cloretos são adsorvidos na superfície do aço, juntamente com hidroxilas e o oxigênio dissolvido, promovendo a hidratação do ferro e viabilizando a sua dissolução em cátions;

- **Teoria do complexo transitório:** há uma disputa entre íons cloretos e ânions OH⁻ para a produção de compostos de corrosão ferrosos, os quais são denominados complexos transitórios. Esses complexos difundem-se do ânodo em direção ao cátodo permitindo a continuidade do processo corrosivo; o íons cloreto agem como “catalisadores” da reação. Esse fenômeno pode ser simplificado pela Equação 2 e pela Equação 3.



Por hidrólise:



Por se combinarem com os aluminatos do cimento, certa quantidade de íons cloreto é admitida no concreto sem gerar risco de corrosão às armaduras. Existe uma concentração limite que pode levar a ruptura da camada passivante e iniciar o processo de corrosão. Embora algumas normas e recomendações estabeleçam esse valor (Tabela 1), ainda não existe um valor fixo consolidado (FIGUEIREDO, 2011; SOARES *et al.*, 2014).

Tabela 1 – Teores críticos de cloretos admitidos por diversas normas e recomendações

Região	Norma/ Guia	Ano	Teores críticos de cloretos totais		
			Concreto armado	Concreto protendido	Referência
Portugal	ENV 206	1992	0,40%	0,20%	Sobre a massa de cimento
Europa	CEB - FIP	1992	0,40%	0,20%	Sobre a massa de cimento
Espanha	EHE	2008	0,20%	0,40%	Sobre a massa de concreto
EUA	ACI	2001	0,15 a 1,0%	0,06%	Sobre a massa de cimento
Europa	NP EN 206-1	2007	0,20 a 0,40%	0,10 a 0,20%	Sobre a massa de cimento
Inglaterra	BS 8110	1997	0,35%	-	Sobre a massa de cimento
Nova Zelândia	NZS3101	2005	0,8 a 1,6 kg/m ³	0,5 kg/m ³	Sobre a massa de concreto

Fonte: Adaptado de Soares *et al.* (2014)

No Brasil, a NBR 12655 (2014) limita o teor de cloretos solúveis em água (cloretos livres) de acordo com a classe de agressividade ambiental, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto

Classe de agressividade	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl⁻) no concreto % sobre a massa de cimento
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: NBR 12655 (2015)

Existem diversas pesquisas sobre a quantificação de cloretos no concreto, entretanto não existe carência de padrões de ensaio, exposição ou quantificação. Alguns autores estabelecem valores para cloretos totais (quantidade de cloretos combinados ao cimento somada a quantidade de cloretos livres), outros limitam os cloretos livres e há também aqueles que fixam a razão máxima entre íons cloreto e íons hidroxila [Cl⁻/OH⁻]. Para aprofundamento neste tema, recomenda-se a leitura de Pfeifer *et al.* (1992), Helene (1993), Alonso *et al.* (2000), Angst & Vennesland (2009), Xu *et al.* (2010), Yu *et al.* (2011), Figueiredo (2011) e Figueiredo e Meire (2011).

2.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO

A resistividade elétrica do concreto é uma propriedade volumétrica que indica a capacidade de o concreto transportar cargas elétricas. Relaciona-se com a permeabilidade de fluidos e difusividade de íons através dos poros do concreto (ANDRADE & D'ANDREA, 2011). Em um concreto saturado, a resistividade elétrica é uma medida indireta da interconectividade entre os poros do concreto (MONFORE, 1968 *apud* MEDEIROS JR., 2014; ANDRADE, 2004).

Essa propriedade do material controla o fluxo de íons que se difundem através da solução aquosa dos poros, e por isso, é sensível ao teor de umidade do material. Assim, o mesmo elemento de concreto tem pelo menos duas regiões onde os valores de resistividade são distintos: uma mais superficial, correspondente à região de cobrimento, denominada resistividade elétrica aparente ou superficial (RES) e outra, mais interna, onde a umidade é mais estável, chamada de resistividade elétrica volumétrica. Para a corrosão, a avaliação mais importante é a da RES, já que é a camada mais superficial que sofre com os ciclos de molhagem e secagem e com a agressividade do meio (HELENE, 1993).

A resistividade elétrica pode ser quantificada através da Equação 4, proveniente da Lei de Ohm (LENCIONI, 2011; ANDRADE, 2014) e sua medida é realizada através da leitura de uma corrente elétrica gerada pela aplicação de uma diferença de potencial entre eletrodos posicionados sobre a superfície do concreto (SANTOS, 2006).

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{L} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

ρ : resistividade elétrica superficial (ohm.cm);

R: resistência elétrica aparente (ohm);

A: área da seção do material condutor (cm²);

L: distância entre eletrodos (cm);

V: diferença de potencial (V);

I: intensidade de corrente (A).

Dentre os métodos de ensaio existentes, destaca-se o de Wenner ou dos quatro pontos. Originalmente era utilizado para solos e mais tarde foi adaptado para uso do concreto (TORRES, 2011). Atualmente, é a técnica mais conhecida e empregada para a obtenção da RES (ANDRADE & D'ANDREA, 2011; LÜBECK *et al.*, 2012 *apud* MEDEIROS JR., 2014).

O ensaio consiste em colocar quatro eletrodos em contato direto com a superfície do concreto, úmida ou seca. O equipamento imprime uma corrente entre os dois eletrodos externos e conseqüentemente uma voltagem é captada pelos eletrodos internos (MEDEIROS, 2001), como apresentado na Figura 7.

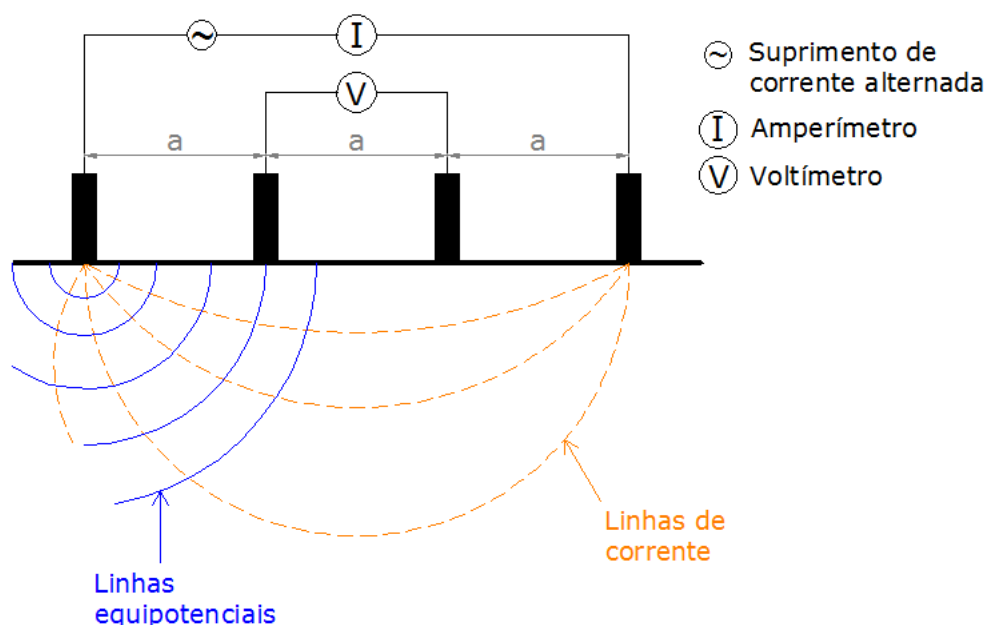


Figura 7 - Esquema do ensaio de quatro pontos para medir resistividade
 Fonte: Adaptado de MEDEIROS (2001)

Os resultados do ensaio de resistividade elétrica podem ser comparados aos limites prescritos pelo boletim 192 do CEB (1989), indicando a probabilidade de corrosão de uma estrutura de concreto armado. É importante ressaltar que os valores apresentados na Tabela 3 foram determinados em condições de laboratório que são difíceis de serem reproduzidas em campo. Na prática, alguns profissionais optam por adotar valores maiores e mais conservadores, trabalhando a favor da segurança (MEDEIROS, 2001; LENCIONI, 2011).

Tabela 3 - Probabilidade de corrosão conforme resistividade elétrica do concreto

Valores de resistividade elétrica (k Ω .cm)	Probabilidade de corrosão
< 5	Muito alta
< 10	Alta
< 20	Baixa
> 20	Negligenciável

Fonte: CEB (1989)

No Brasil, não existe uma norma regulamentadora para o ensaio de resistividade elétrica superficial. Atualmente, apenas o ensaio de resistividade elétrica volumétrica é normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR 9204/1985: Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica-volumétrica. Como não há padrões nacionais estabelecidos, cada pesquisador adota seus métodos de ensaios e, conseqüentemente, inexistente uniformidade nos procedimentos.

Na Espanha, o ensaio dos quatro pontos já é normatizado pela UNE 83988-2 (2012), que define que a resistividade elétrica do concreto saturado é uma medida indireta da conectividade e tamanho de seus poros. Já para um concreto não saturado, a RES é um forte indicador do grau de saturação do material.

A resistividade elétrica do concreto depende da estrutura dos poros e da composição química da solução aquosa que os preenche. Um mesmo material pode atuar tanto como isolante (que impede a condução de eletricidade por não possuir elétrons livres), quanto como semicondutor elétrico (um material que a uma determinada condição de temperatura e pressão não possui elétrons livres, mas com a modificação dessas condições pode liberar elétrons e conduzir eletricidade). Apresenta-se na Figura 8 uma condução iônica em uma pasta de cimento endurecida. Podem ser observados: gel do cimento, poros capilares contínuos e descontínuos. A solução aquosa dos poros contém íons positivos e negativos. Quando não há corrente elétrica externa, os íons se distribuem uniformemente na pasta endurecida. Aplicando-se um campo elétrico, os íons positivos se movem para o cátodo e os íons negativos para o ânodo. Porém, nos poros descontínuos ou fechados a carga passante é bloqueada (BRAMESHUBER e RAUPACH, 2003 *apud* HOPPE, 2005).

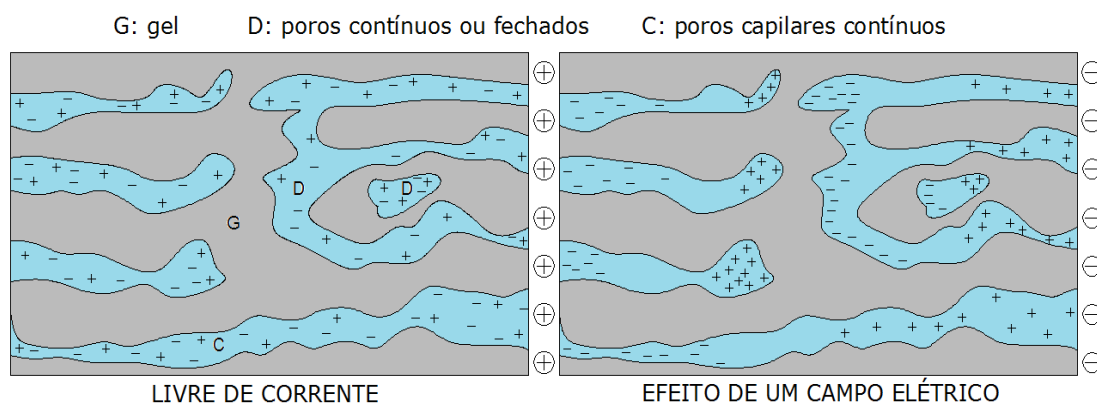


Figura 8 – Condução iônica no sistema de poros de pasta de cimento endurecida
 Fonte: Adaptado de Brameshuber & Raupach (2003) *apud* Hoppe (2005)

Alguns fatores podem influenciar o resultado da RES avaliado através do método dos quatro pontos, tais como: relação água/cimento, origem e dimensão dos agregados utilizados, hidratação e tipo de cimento, presença de adições minerais, geometria da peça, temperatura e umidade do ambiente ou a presença de íons cloreto (LENCIONI, 2011).

2.2.1. Relação água/cimento

A relação água/cimento é o principal parâmetro controlador das características do concreto, influenciando a resistência mecânica e propriedades ligadas à durabilidade. Em relação à resistividade elétrica, a relação água/cimento tem influência indireta, pois influencia a estrutura e a concentração iônica da solução aquosa dos poros, fatores que, como exposto anteriormente, atuam diretamente na RES do concreto (HOPPE, 2005; FERREIRA, 2011). Assim, quanto maior a relação água/cimento, maior o volume de poros e maior é a probabilidade de existirem poros com maiores diâmetros e interconectados e, portanto, menor será a resistividade elétrica (ABREU, 1998; SANTOS, 2006).

Apresentam-se na Figura 9 os resultados obtidos por Hughes *et al.* (1985); para um mesmo consumo de cimento, quanto maior a relação água/cimento, menor a resistividade elétrica do concreto. As medições foram realizadas aos 28 dias em cura úmida (ABREU, 1998).

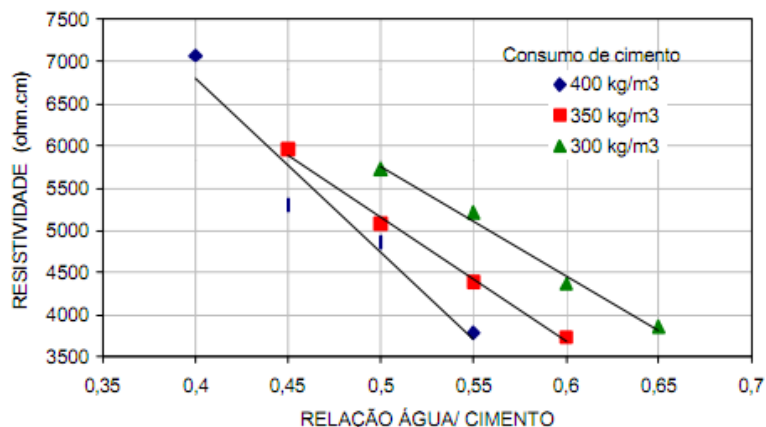


Figura 9- Influência da relação água/cimento e do consumo de cimento na RES do concreto
 Fonte: Hughes *et al.* (1985) *apud* Abreu (1998)

Tais resultados estão de acordo com os obtidos por Woelfl & Lauer (1979), que verificaram a influência da relação a/c testando três valores de relação água/cimento (0,40; 0,50; 0,60) para uma relação agregado/aglomerante constante e igual a 2. Os pesquisadores concluíram que a RES do concreto diminuiu com o aumento da relação a/c (LENCIONI & LIMA, 2010).

Além disso, em 2011, Lencioni obteve resultados indicando que um concreto de relação a/c=0,45 resultada em valores de RES 30% superiores aos de um concreto com a/c=0,65 (ambos executados com os mesmos materiais e curados em câmara úmida até o momento dos ensaios). Comparando tipos iguais de cimento, a mesma idade de ensaio, Medeiros JR. *et al.* (2014) também observaram que a RES decresceu à medida que a relação a/c aumentou, como ilustrado na Figura 10. As amostras foram curadas em câmara úmida até o momento das leituras.

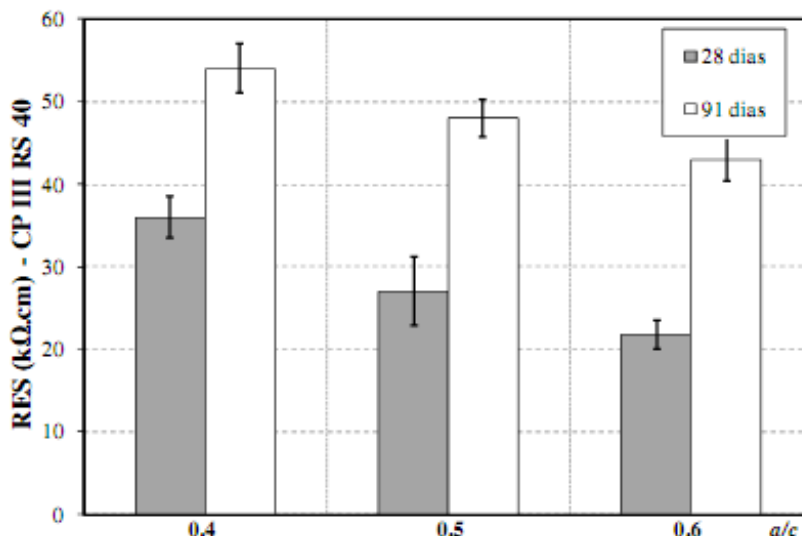


Figura 10 – Resistividade elétrica superficial x relação água/cimento para CP III – RS 40
Fonte: Medeiros Jr. *et al.* (2014)

2.2.2. Agregados

Ao se empregar a técnica de Wenner para monitoramento da resistividade elétrica, assume-se que o material seja homogêneo. Entretanto, as partículas de agregado do concreto apresentam uma resistividade elétrica maior do que a da pasta de cimento (Tabela 4), o que faz com que grande parte da corrente seja conduzida através da pasta (GOWERS & MILLARD, 1999; SANTOR, 2011; FERREIRA, 2011).

Tabela 4 – Resistividade elétrica de rochas

Tipo de agregado	Resistividade (kΩ.cm)
Arenito	18
Rocha calcária	30
Mármore	290
Granito	880

Fonte: Monfore (1968) *apud* Ferreira (2011)

Além disso, a presença de agregados causa obstrução da passagem da corrente elétrica, fazendo com que o comprimento efetivo da trajetória a ser percorrida pela corrente seja maior do que a dimensão do material na direção da

corrente. Assim, quanto maior o teor de agregados, maior será o efeito de obstrução e maior será a resistividade (MONFORE, 1968 *apud* FERREIRA, 2011). Também é importante ressaltar que a resistividade elétrica do concreto é muito mais sensível às alterações das características da pasta de cimento do que às mudanças no tipo de agregado (SANTOS, 2006).

Em 1985, Hughes *et al.* realizaram um estudo comparando dois teores de agregados graúdos de diâmetro máximo característico igual a 40 mm. Ao aumentar o teor unitário de agregado de 2,92 para 4,36, a resistividade elétrica passou de 4,86 a 5,73 k Ω .cm, indicando que com o aumento do teor do agregado, eleva-se a RES do concreto. Seguindo a mesma tendência, Princigallo *et al.* (2003) realizaram um experimento e concluíram que, quando o teor de agregado aumenta, a condutividade do concreto diminui, provavelmente porque a resistividade elétrica do agregado é maior do que a da pasta (HOPPE, 2005).

Ao se utilizar o método dos quatro pontos para avaliação da RES deve-se considerar a dimensão máxima característica (DMC) pode influenciar na determinação do espaçamento dos eletrodos, devido à formação das linhas de corrente e das equipotenciais. Gowers & Millard (1999) e Medeiros (2001) recomendam a utilização de um espaçamento pelo menos 1,5 vezes maior do que a DMC do agregado graúdo utilizado no concreto.

2.2.3. Aditivos

Whiting & Nagi (2003) não encontram efeito direto dos aditivos sobre a resistividade elétrica do concreto. No entanto, os aditivos podem causar efeitos indiretos, como por exemplo, devido à redução da relação água/cimento proporcionada ao se utilizar plastificantes ou superplastificantes (SANTOR, 2011; FERREIRA, 2011).

Os aditivos incorporadores de ar (IAR), apesar de pouco influenciarem a trabalhabilidade do concreto fresco, modificam a estrutura dos poros e provavelmente afetariam a resistividade elétrica (SANTOR, 2011; FERREIRA, 2011). Porém, Santos (2006) ressaltava que os poros formados pelos IAR apresentam baixa interconectividade e não aumentariam a capacidade de

condução de corrente elétrica; ao contrário, atuariam interrompendo os capilares do concreto, causando descontinuidades.

Medeiros Jr. (2014) e Real *et al.* (2014) optaram por não utilizar aditivos em seus experimentos a fim de evitar quaisquer influências que esses pudessem causar nos concretos estudados. Já Abreu (1998) utilizou teores diferentes de aditivos, desconsiderando possíveis influências na resistividade elétrica.

2.2.4. Cimento e cura

O tipo de cimento, o teor de álcalis e o teor de aluminato tricálcico (C_3A) são elementos relacionados à química do cimento que influem na resistividade elétrica do concreto (WHITING & NAGI, 2003 *apud* HOPPE, 2005) e, portanto, a RES também é afetada pelo tipo de cimento utilizado.

Os resultados apresentados por Abreu (1998) demonstraram que a utilização do cimento pozolânico (CP IV-32) possibilitou a obtenção de concretos com resistividade elétrica significativamente superior aos com cimento CPV-ARI. Entretanto, o incremento da resistividade não foi acompanhado pelo aumento da resistência à compressão ou pela redução da porosidade.

Santor (2011) encontrou valores de resistividade elétrica, em média, 11 vezes maiores para concretos com CP IV do que os obtidos nos concretos com CP II. Enquanto, aos 159 dias, o CP IV pode ser classificado, segundo o CEB 192 (Tabela 3), com probabilidade de corrosão desprezível, o CP II F se enquadrou com baixa probabilidade de corrosão. Isso pode ser justificado pelas alterações na microestrutura da pasta, refinamento dos poros e composição da solução nos poros.

Medeiros Jr. *et al.* (2014) compararam as resistividades elétricas de quatro tipos de cimento (CP IV 32, CP III 40 RS, CP II-F 32 e CP V ARI) e encontraram os maiores valores de RES para as amostras com cimento CP III 40 RS, com alto teor de escória de alto forno (Figura 11). Provavelmente, assim como ocorreu para Santor (2011), essa adição contribuiu para refinar os poros do concreto, reduzindo a condutividade do meio, e proporcionando maiores valores medidos de RES.

A RES aumenta com a idade do concreto, significando progresso na hidratação do cimento. Além disso, segundo Whittington *et al.* (1981), a quantidade de água evaporável em uma pasta de cimento varia de 60%, no momento da mistura, a 20% após hidratação completa do cimento. Se o grau de hidratação influencia a resistividade, é importante considerar que a melhora nas condições de cura do concreto diminui a sua condutividade elétrica tornando o aço do concreto armado menos susceptível a corrosão. A Figura 11 mostra o efeito da elevação do tempo de cura úmida do concreto na sua resistividade elétrica superficial.

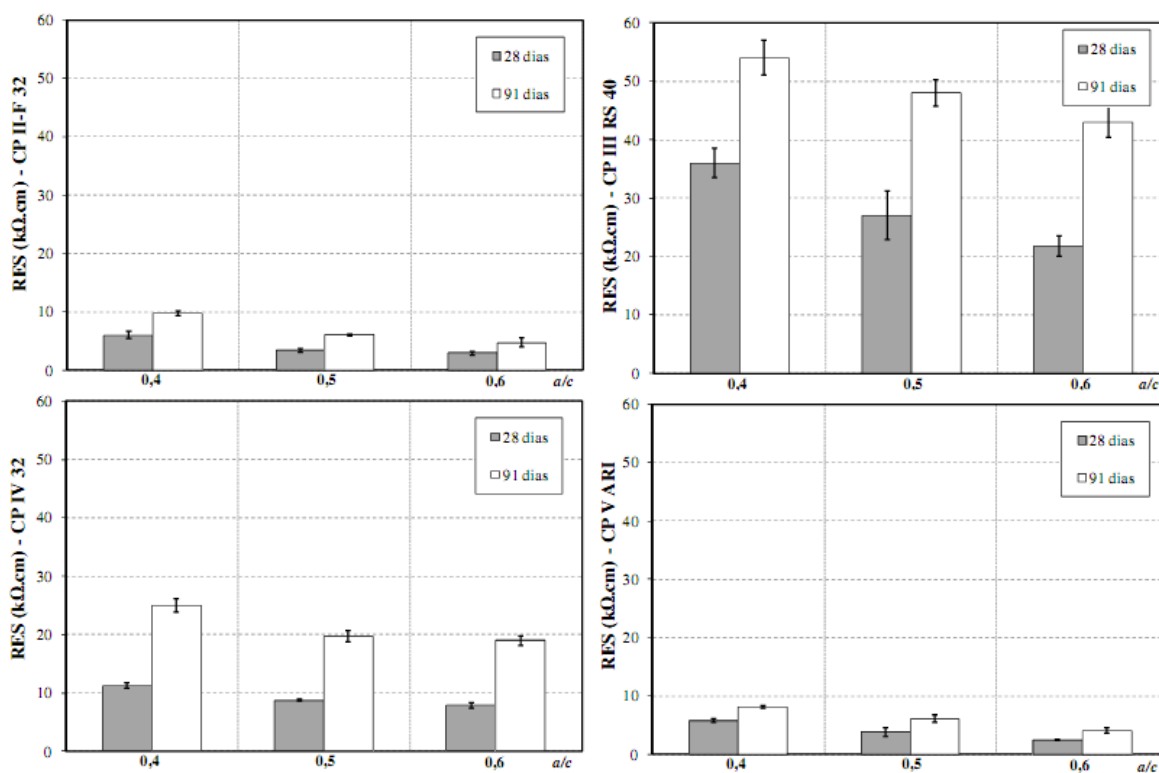


Figura 11 – Valores de resistividade elétrica do concreto para diferentes tipos de cimento
Fonte: Medeiros Jr. *et al.* (2014)

2.2.5. Adições pozolânicas

As adições minerais podem ser classificadas em três grupos: cimentantes, que não necessitam de hidróxido de cálcio para formar produtos resistentes compostos de C-S-H; materiais pozolânicos, que reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio desde que na presença de água,

resultando em géis C-S-H; fíler, materiais finamente divididos e sem atividade química, que causam o efeito físico de empacotamento granulométrico (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Ilustra-se na Figura 12 parte dessas adições, excluindo as de efeito fíler.

CIMENTANTES E POZOLÂNICAS	POZOLANAS ALTAMENTE REATIVAS	POZOLANAS COMUNS	POZOLANAS COMUNS
<ul style="list-style-type: none"> • Escória granulada de alto forno (cimentante) • Cinza volante de alto teor de cálcio 	<ul style="list-style-type: none"> • Sílica ativa • Cinza de casca de arroz 	<ul style="list-style-type: none"> • Cinza volante de baixo teor de cálcio • Materiais naturais 	<ul style="list-style-type: none"> • Escória de alto forno resfriada lentamente • Cinza de casca de arroz queimada em grelha • Cinza de casca de arroz queimada em campo

Figura 12 – Classificação de adições minerais para concreto
Fonte: Adaptado de Abreu (1998) e Mehta & Monteiro (2014)

As adições pozolânicas são aluminossilicatos reativos, que se solubilizam em meio alcalino e reagem em solução com os íons Ca^{2+} , sendo o silicato de cálcio hidratado o principal produto dessa reação (SILVA, 2007).

Com o uso de adições pozolânicas, ocorre um refinamento e melhor distribuição do tamanho dos poros na microestrutura da pasta, o que contribui para torná-la mais densa. Na composição da solução aquosa dos poros, ocorre uma redução na concentração dos íons, reduzindo a condutividade elétrica da solução dos poros. Assim, o uso dessas adições contribui diretamente para o aumento da resistividade elétrica do concreto (HOPPE, 2005).

Em concordância com apresentado acima, Dal Molin (2011) afirma que as adições modificam a estrutura interna do concreto através dos seguintes efeitos:

- **Efeito microfíler:** aumento da densidade da mistura, resultante do preenchimento dos vazios pelas partículas das adições, que possuem diâmetro médio igual ou menor que o diâmetro médio das partículas de cimento;
- **Refinamento dos poros:** a adição mineral restringe os espaços nos quais os produtos de hidratação podem crescer, gerando um grande número de pequenos cristais;

- **Alteração na microestrutura da zona de transição:** melhora significativa da zona de transição devido à redução da exsudação e preenchimento de vazios deixados pelas partículas de cimento.

Baweja *et al.* (1996) observaram que com adição de 25% de cinza volante em substituição parcial do cimento, a resistividade elétrica do concreto aumentou significativamente nas três relações água/aglomerante investigadas (0,45, 0,55 e 0,65), conforme exposto na Figura 13.

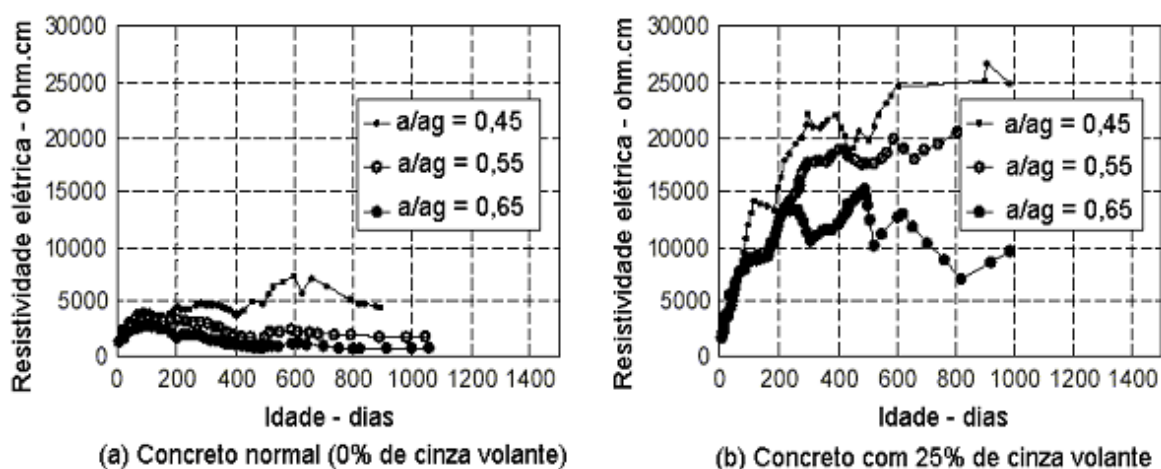


Figura 13 - Efeito da cinza volante na resistividade elétrica do concreto
Fonte: Whiting & Nagi (2003) *apud* Santor (2011)

Hussain e Rasheeduzzafar (1994) verificaram que houve refinamento e melhor distribuição do tamanho dos poros ao se substituir 30% do cimento por cinza volante. Como consequência, a resistividade elétrica do concreto com adição de cinza volante foi 2,2 vezes maior do que a obtida com o concreto com 100% de cimento.

Missau (2004) investigou a influência do teor de cinza de casca de arroz na resistividade elétrica de concretos curados em câmara úmida. Os teores de substituição em massa do cimento por cinza de casca de arroz utilizados foram 10%, 20% e 30% e a relação água/aglomerante foi 0,50. Os resultados mostraram elevação na resistividade elétrica com o aumento do teor de substituição e grau de hidratação, como mostra a Figura 14, sendo:

- REF: 100% cimento;
- V35: 35% cinza volante;
- E50: 50% escória de alto forno;

- 10A, 20A e 30A: 10%, 20% e 30% cinza de casca de arroz.

Este estudo também mostrou que a cinza volante e a escória de alto forno elevam a resistividade elétrica do concreto.

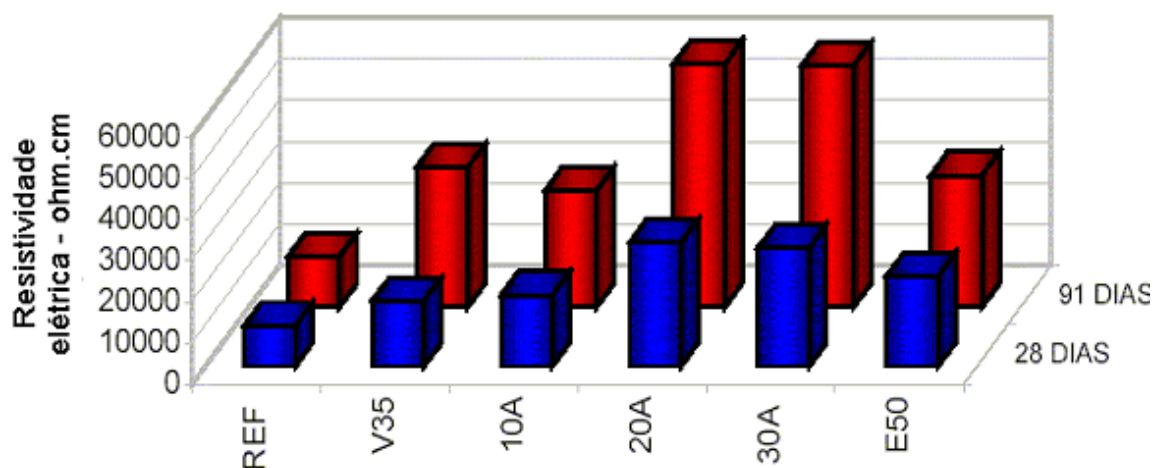


Figura 14 - Efeito da cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto
Fonte: Missau (2004)

Em 1998, Abreu comparou a resistividade elétrica de um concreto composto apenas por cimento CPV ARI com a RES de concretos com sílica ativa ou cinza de casca de arroz em dois teores (6% e 12%), substituindo o cimento em massa. As relações água/aglomerante adotadas foram 0,50, 0,65 e 0,80. Três condições de cura foram usadas: em câmara úmida até os 28 dias (a $23\pm 1^{\circ}\text{C}$), em câmara climatizada (a $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa igual a $65\pm 5\%$) dos 28 aos 91 dias e submerso dos 91 aos 217 dias. Os resultados médios (calculados com base nas três relações água/cimento ensaiadas) mostraram um aumento na resistividade elétrica com o uso dessas adições, principalmente em câmara climatizada, em comparação ao concreto com 100% de CPV ARI, como pode ser observado na Figura 15, sendo:

- CCA: cinza de casca de arroz;
- SA: sílica ativa;
- C POZ: cimento pozolânico;
- C ARI : cimento de alta resistência inicial.

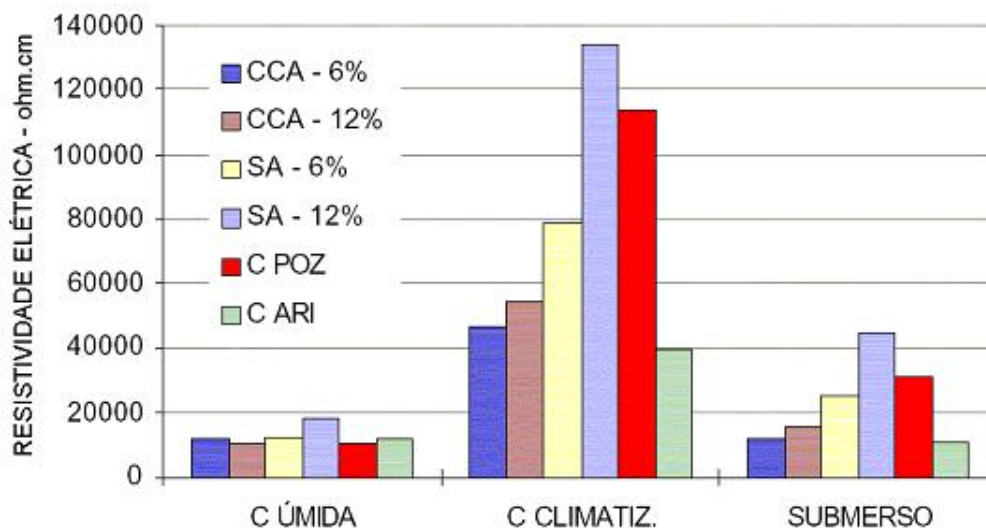


Figura 15 - Influência da sílica ativa e cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto
Fonte: Abreu (1998)

Hoppe (2005) comparou resistividades elétricas aos 91 dias de idade para as relações água/aglomerante iguais a 0,35, 0,50 e 0,65 dos seguintes concretos:

- 10A (10% de substituição de cimento por cinza de casca de arroz);
- 20A (20% de substituição de cimento por cinza de casca de arroz);
- 30A (30% de substituição de cimento por cinza de casca de arroz);
- 35V (35% de substituição de cimento por cinza volante);
- 50E (50% de substituição de cimento por escória de alto forno).

Para a relação água/aglomerante igual a 0,35, os resultados de Hoppe (2005) mostraram que a RES dos traços 10A, 20A e 30A aumentaram 41%, 157% e 341%, respectivamente, se comparados com a série de referência (concreto sem adições). Para a relação água/aglomerante igual a 0,50, os valores foram 88%, 269% e 442% e para 0,65, foram 79%, 243% e 404% maiores que os obtidos no concreto de referência. A mistura 35V obteve resistividade elétrica 132%, 229% e 220% superior a de referência, respectivamente nas relações água/aglomerante 0,35, 0,50 e 0,65. O traço 50E também obteve resistividade elétrica superior ao concreto de referência, em 144%, 273% e 291%, respectivamente nas relações água/aglomerante 0,35, 0,50 e 0,65.

Santos (2006) observou que as misturas contendo sílica ativa apresentaram valores de resistividade elétrica superiores aos apresentados pelas misturas de referência. Em seu experimento, o acréscimo de resistividade elétrica para um concreto de $a/c=0,40$ e 10% de substituição de cimento por sílica ativa foi

de 98% aos 3 dias, 194% aos 7 dias, 600% aos 28 dias, 704% aos 63 dias e chegou a 778% aos 91 dias. Um comportamento semelhante, porém com menor intensidade, foi observado na mistura com sílica ativa e $a/c=0,5$, como pode ser observado na Figura 15.

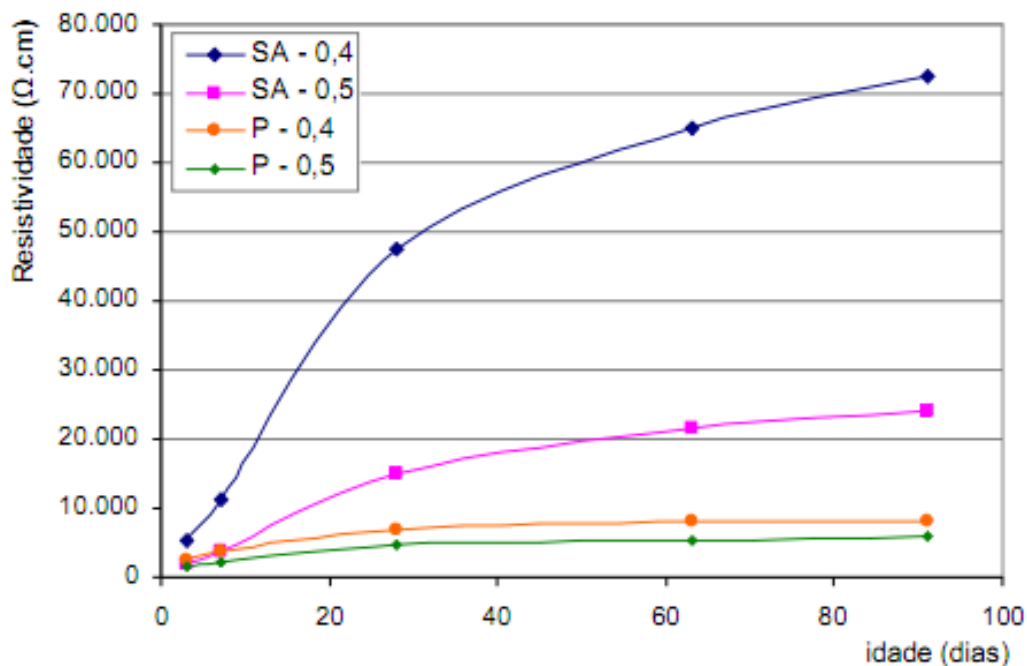


Figura 16 - Influência da sílica ativa e na resistividade elétrica do concreto
Fonte: Santos (2006)

2.2.6. Geometria da peça

Gowers & Millard (1999) apresentaram um estudo com parâmetros geométricos que devem ser adotados nas leituras efetuadas através do método dos quatro pontos, a fim de evitar que ocorra fuga de corrente nas amostras investigadas. Na Figura 17 é apresentado o esquema dos parâmetros geométricos cuja adoção é recomendada por esses autores, sendo “a” o espaçamento entre eletrodos.

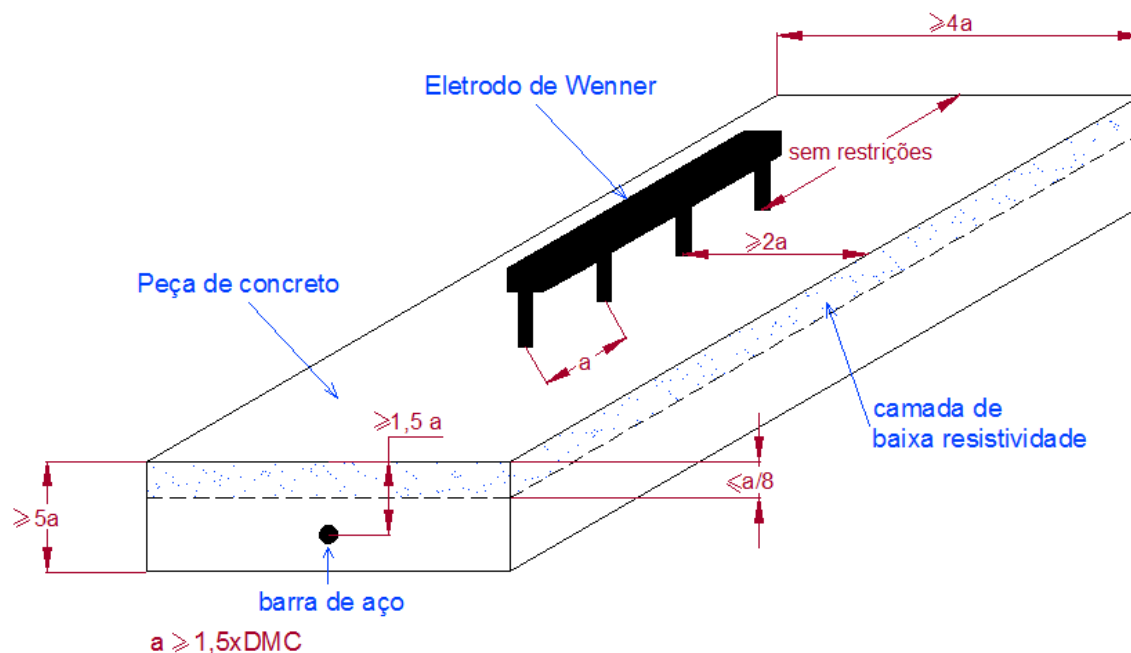


Figura 17 – Recomendações de parâmetros geométricos para ensaio com eletrodo de Wenner
 Fonte: Adaptado de Gower & Millard (1999)

As leituras próximas das bordas de peças de concreto devem ser evitadas para não conduzir a distorções nos resultados, superestimando as medidas devido à influência de regiões mais resistivas. É de extrema importância realizar as leituras em regiões do elemento de concreto livres das armaduras para evitar que os resultados sejam subestimados pela influência de um elemento mais condutor. Isto pode ser facilitado com o auxílio de um localizador de armaduras, muito usado como técnica auxiliar em inspeções efetuadas em campo (MEDEIROS, 2001).

2.2.7. Íons cloreto

O efeito dos íons cloreto na resistividade elétrica do concreto ainda é contraditório (LEOCINI, 2011). Em 1982, Gjorv *et al. apud* Tuutti afirmaram que a resistividade elétrica do concreto reduz em 50% quando o teor de CaCl_2 passa de 0 a 4% em relação à massa de cimento (CASCUDO, 1997).

De acordo com Brommfield (2007), a presença de cloretos não afeta fortemente a resistividade elétrica do concreto, pois como já há uma abundância de íons dissolvidos na água dos poros, os cloretos não fariam diferença. No

entanto, como podem ser higroscópicos, os íons cloreto são frequentemente acusados de reduzirem a RES. Em concordância com tal fato, Lencioni (2011) acrescentou ao concreto fresco 3% de cloretos em relação à massa de cimento e não encontrou variação significativa ao comparar as resistividades elétricas de concretos com e sem cloretos.

Entretanto, em 2006, Santos incorporou 0,4 e 1,0% de cloreto em relação à massa de cimento para os traços expostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Traços de Santos (2006)

Nome	C _{sílica ativa} (kg/m ³)	C _{cimento} (kg/m ³)	Tipo de cimento	Relação água/cimento
SA – 0,4	53,2	478,9	CPII – F - 32	0,44
P – 0,4	-	532,1	CPII – F -32	0,40
SA – 0,5	53,3	479,4	CPII – F -32	0,56
P – 0,5	-	532,6	CPII – F -32	0,50

Fonte: Santos (2006)

Conforme pode ser observado na Figura 18, no traço SA – 0,4, a adição de cloretos não provocou alterações aos 3 e 7 dias. No entanto, após o 7 dias, foi constatada uma redução de 28% na resistividade elétrica para o traço com adição de 0,4% de Cl⁻ em relação à mistura isenta de cloretos e de 47% para a contaminação com 1% de Cl⁻. Para o traço SA – 0,5 o comportamento foi oposto ao traço anterior; os traços com adição de cloretos se apresentaram mais resistivos do que os isentos. Ressalta-se que com a adição de 1% de Cl⁻ houve uma redução de 25% em relação à incorporação de 0,4% de Cl⁻. Ou seja, quanto mais cloretos, menor a resistividade elétrica, porém ainda superior que o traço de referência, sem cloretos. Para os traços sem adição de sílica ativa, a mistura isenta de cloretos apresentou menor resistividade que os traços contaminados.

Segundo Santos (2006) não foi observado resultado comum da influência da concentração de cloretos livres presentes no concreto com a resistividade elétrica, mas foi possível observar maior influência nas misturas que continham sílica ativa em relação às misturas de referência.

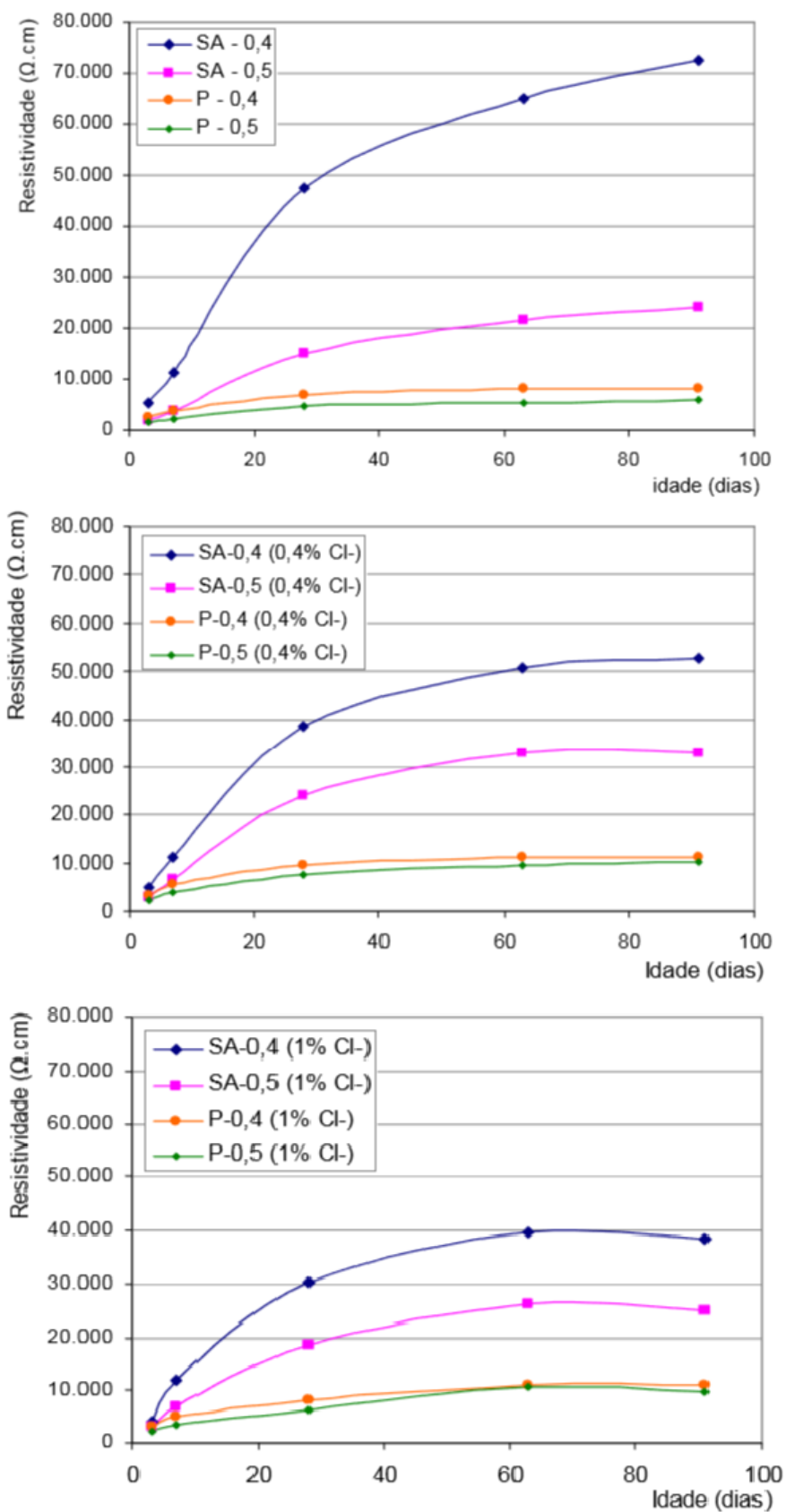


Figura 18 – Influência da adição de cloretos na resistividade elétrica do concreto
Fonte: Santos (2006)

2.3. MODELO DE VIDA ÚTIL DE ANDRADE (2004)

O modelo de vida útil proposto por Andrade em 2004 foi desenvolvido e é amplamente estudado pelo grupo de pesquisa sobre durabilidade do concreto do Instituto de Ciência da Construção Eduardo Torroja, localizado em Madrid (ANDRADE, 2004; ANDRADE, 2005; ANDRADE, 2013; ANDRADE, 2014).

Recentemente, o modelo foi aplicado para o desenvolvimento do concreto para ampliação do Canal do Panamá. A obra teve início em 2011 e a Autoridade do Canal do Panamá, responsável pela construção, expôs como necessidade uma vida útil de 100 anos para o concreto de todos os elementos construtivos e que para garantir isso, fosse aplicado um modelo de vida útil. O programa experimental desenvolvido para esta especificação de concreto para o Canal do Panamá está detalhado por Andrade *et al.* (2013).

Além disso, no Brasil, o modelo de Andrade (2004) foi aplicado por Santos (2006) na previsão de iniciação da corrosão com base na resistividade elétrica do concreto e por Medeiros Jr. (2014), que teve como objetivo ajustar o modelo para a realidade brasileira, a fim de facilitar a aplicação do cálculo do período de iniciação da corrosão na prática.

Santos (2006) analisou a relação entre a resistividade e fatores que podem influenciar o período de iniciação da corrosão, tais como: porosidade, absorção, coeficiente de difusão e a presença de cloretos no concreto. Além disso, o autor induziu a corrosão acelerada por contaminação de cloretos para comparar os parâmetros e valores obtidos na realidade com os propostos por Andrade (2004). Os resultados apresentados por Santos (2006) e Medeiros Jr. (2014) estão expostos ao longo deste trabalho.

Como exposto anteriormente, o processo de corrosão se divide em duas etapas; iniciação e propagação. A iniciação corresponde ao tempo desde a execução da estrutura até o momento em que o agente agressivo atinge a armadura e a despassiva. A propagação consiste no desenvolvimento do processo corrosivo até o fim do grau aceitável desse fenômeno (TORRES, 2011). O modelo proposto por Andrade (2004) considera esses dois períodos, sendo caracterizado por uma equação de dois termos ($t_{\text{vida útil}} = t_{\text{iniciação}} + t_{\text{propagação}}$), conforme exposto na Equação 5.

$$t_l = \frac{x^2 \cdot \rho_{ef} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^q \cdot r_{Cl}}{F_{Cl}} + \frac{p_x \cdot \left(\rho_{ef} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^q \cdot \xi\right)}{k_{corr} \cdot 0,00116}$$

Equação 5

Onde:

t_l : tempo de vida útil (anos);

x : profundidade de penetração da concentração limite de cloretos (cobrimento do concreto);

ρ_{ef} : resistividade elétrica superficial da primeira medição realizada;

t : idade em que a resistividade elétrica foi mensurada pela última vez para definição do fator de idade e aplicação do modelo;

t_0 : idade em que a resistividade elétrica foi mensurada a primeira vez;

q : fator de idade;

r_{Cl} : fator de reação de cloretos;

F_{Cl} : fator que depende do teor de cloretos do ambiente;

p_x : perda de seção no tempo t ;

ξ : fator ambiental devido ao aumento da resistividade quando o concreto seca;

k_{corr} : constante de corrosão, igual a $26 \mu A/cm^2 \cdot k\Omega \cdot cm$.

A equação considera ambos os períodos de iniciação e propagação. Isto significa que o estado limite é assumido até atingir um determinado grau de corrosão da armadura. No entanto, também pode ser aplicado considerando a despassivação como estado limite. Nesse caso, apenas o primeiro termo da equação seria necessário (ANDRADE, 2004). Nesta pesquisa apenas o tempo de iniciação foi investigado.

2.3.1. Fator de idade (q)

Devido ao progresso da hidratação do cimento e ao refinamento dos poros, a resistividade evolui ao longo do tempo. Para simular isto, aplica-se o fator

de idade (q), que pode ser calculado através da Equação 6 (ANDRADE & D'ANDREA, 2010; MEDEIROS JR., 2014).

$$\rho_t = \rho_0 \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^q$$

Equação 6

Onde:

ρ_t : resistividade elétrica em qualquer idade ($\Omega \cdot \text{cm}$);

ρ_0 : resistividade elétrica na primeira idade de medição ($\Omega \cdot \text{cm}$);

t : idade da medição (anos);

t_0 : idade da primeira medição (anos);

q : fator de idade.

O fator de idade é definido graficamente, conforme indicado na Figura 19, onde a inclinação da curva obtida ao se representar o logaritmo do inverso da resistividade em função do tempo é o valor de $-q$ (ANDRADE *et al.*, 2013b).

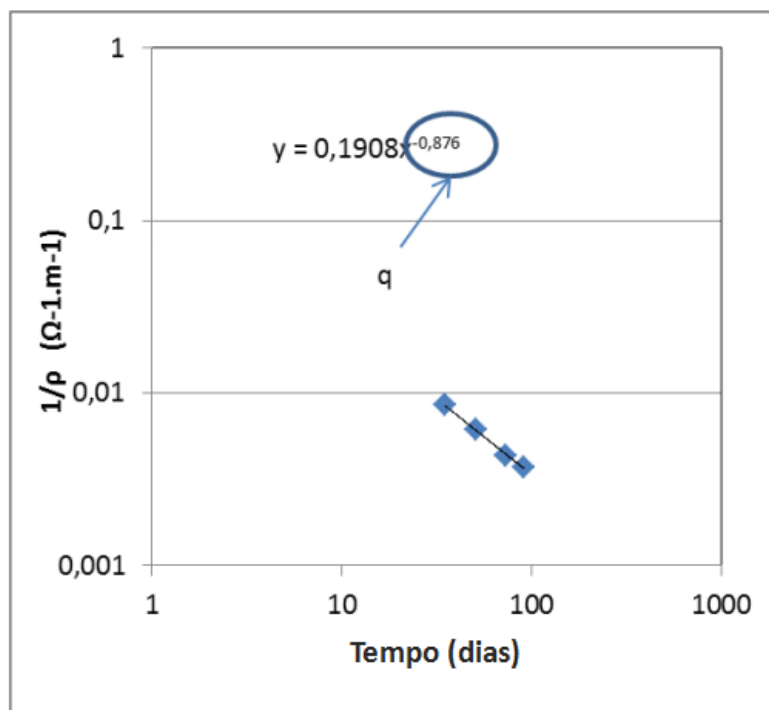


Figura 19 – Exemplo de como definir o fator de idade “q”
Fonte: Andrade *et al* (2013b)

O fator de idade varia conforme o tipo de cimento utilizado, devido à progressão da hidratação ao longo do tempo. Andrade & D'Andrea (2010) e Andrade (2014) propuseram os valores de q apresentados na Tabela 6 para diferentes tipos de cimento.

Tabela 6 – Valores de q para diferentes tipos de cimento europeus

Tipo de cimento europeu	Tipo de cimento brasileiro equivalente	q	Desvio padrão
I	CP I (sem adições)	0,22	0,01
II A – P	CP II-Z (com adição de 6 a 20% de pozolana natural)	0,37	0,06
II A - V	CP II-E (com adição de 6 a 20% de cinza volante)	0,57	0,08

Fonte: Andrade & D'Andrea (2010) & Andrade (2014)

Apesar de Andrade & D'Andrea (2010) e Andrade (2014) terem proposto os fatores de idade “ q ” conforme o tipo de cimento, Andrade *et al.* (2013) calcularam e apresentaram valores de “ q ” para concretos compostos com adição pozolânica (sem definição do material específico no artigo) e sílica ativa, conforme os traços expostos na Tabela 7.

Comparando os cimentos indicados por Andrade & D'Andrea (2010) com traços os utilizados por Andrade *et al.* (2013), é possível observar que as dosagens 5 e 6 são compostas por aglomerantes semelhantes ao II A – P. Todavia, o valor do fator de idade “ q ” não é semelhante nas três situações. Comparando cimento II A - P com o traço 5, o fator de idade eleva-se em 70%. Em relação ao 6, o aumento é de 94%. Isso pode ter ocorrido, pois a pesquisa de Andrade *et al.* (2013) pode ter utilizado um cimento tipo CP II (que já contém adições em sua composição) mais uma adição pozolânica. Assim, as reações ocorreriam de forma mais lenta, conforme sugere o aumento do fator de idade, que representa o quanto a resistividade ainda será aumentada devido à progressão do tempo. Não é possível afirmar isso com certeza, pois o artigo não deixa claro qual a composição do cimento utilizado. Em relação ao fator de idade o cimento II A – V, os valores dos traços 5 e 6 são mais próximos. Ainda assim, vale ressaltar que o “ q ” aumenta em 12% apenas pela alteração da origem (do cimento do Panamá para o Cemex, conforme se apresenta na Tabela 7).

Tabela 7 – Valores de q para concretos com sílica ativa e pozolana

Traço	Tipo de cimento	Pozolana	Sílica ativa	Relação água/cimento	C _{cimento} (kg/m ³)	q
1	Panamá CEM II ⁽¹⁾	56,3	18,8	0,29	300	0,492
2	Cemex CEM II	56,3	18,8	0,30	300	0,492
3	Panamá CEM II	47	19	0,34	264	0,349
4	Cemex CEM II	47	19	0,34	264	0,609
5	Panamá CEM II	43	-	0,34	289	0,629
6	Cemex CEM II	43	-	0,34	289	0,718

(1) O cimento CEM II equivale ao cimento brasileiro tipo CPII, porém o artigo não especificou o tipo de adição utilizada na fabricação dos cimentos.

Fonte: Andrade et al. (2013b)

Medeiros Jr. (2014) determinou valores do fator de idade para as relações água/cimento igual a 0,4, 0,5 e 0,6 para os cimentos brasileiros CPII-F, CPIII, CPIV e CPV, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores de q para diferentes tipos de cimento brasileiros e relações água/cimento

Tipo de cimento	Relação água/cimento	q	Desvio padrão
CP II-F	0,40	0,415	0,031
	0,50	0,535	0,027
	0,60	0,594	0,054
CPIII RS	0,40	0,532	0,027
	0,50	0,594	0,027
	0,60	0,616	0,020
CPIV	0,40	0,738	0,007
	0,50	0,780	0,005
	0,60	0,785	0,030
CPV-ARI	0,40	0,297	0,012
	0,50	0,384	0,052
	0,60	0,547	0,029

Fonte: Medeiros Jr. (2014)

Apesar de Santos (2006) não ter determinado valores de fator de idade para os traços ensaiados, o autor observou que houve comportamento similar da evolução da relação entre a resistividade medida aos 28 dias e a resistividade final avaliada nas misturas de mesmo tipo de concreto, independentemente da relação água/aglomerante utilizada. Tal fato está em concordância com os resultados obtidos por Medeiros Jr. (2014), já que Santos (2006) realizou testes com CPII – F e relações água/aglomerante iguais a 0,40 e 0,50. Nessas situações, Medeiros Jr. (2014) também obteve resultados similares entre os fatores de idade cálculos, com apenas 28% de diferença.

2.3.2. Fator ambiental (k_{Cl})

O fator ambiental, expressado por F_{Cl} ou k_{Cl} , depende da concentração externa de agentes agressivos. Pode ser determinado com base na Equação 7 (ANDRADE, 2004; ANDRADE, 2005; ANDRADE, 2014) ou a partir do cálculo do período de iniciação da corrosão, exposto na Equação 5, página 42.

$$D_{ef} = \frac{k_{Cl}}{\rho_{ef}} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

D_{ef} : coeficiente de difusão efetivo ou coeficiente de difusão no estado estacionário (cm^2/ano);

k_{Cl} : fator ambiental;

ρ_{ef} : resistividade elétrica efetiva, mensurada aos 28 dias de idade, no concreto saturado em água ($\Omega.\text{cm}$).

Andrade & D'Andrea (2010) e Andrade (2014) apresentaram valores para k_{Cl} para as condições de exposição da norma europeia NP EN 206-1 (2007). Esses valores que foram obtidos através de análises inversas em estruturas reais, com base nos valores referentes ao período de iniciação da corrosão e aplicação da Equação 5. Os valores de k_{Cl} estão apresentados na Tabela 9, conforme a respectiva relação entre as classes de agressividade da norma europeia e as prescritas na norma brasileira NBR 6118 (2014).

Tabela 9 - Valores de k_{Cl} para diferentes tipos classes de agressividade

NP EN 206-1 (2007)		k_{Cl} ($\text{cm}^3.\Omega/\text{ano}$)	NBR 6118 (2014)	
Classe de agressividade	Descrição		Classe de agressividade	Descrição
X0	Concreto não armado e para concreto armado em ambiente muito seco	200	I - Fraca	Rural ou submersa
XC1	Seco ou permanentemente úmido	1000	II - Moderada	Urbana
XC3	Moderadamente úmido	3000		

NP EN 206-1 (2007)		k_{Cl} ($cm^3.\Omega/ano$)	NBR 6118 (2014)	
Classe de agressividade	Descrição		Classe de agressividade	Descrição
XS1a	Ar transportando sais marinhos, mas sem contato direto com a água do mar (distância da estrutura ao mar > 500 m)	5000	III - Forte	Marinha ou Industrial
XS1b	Ar transportando sais marinhos, mas sem contato direto com a água do mar (distância da estrutura ao mar < 500 m)	10000		
XS2	Submersão permanente	17000	I - Fraca	Rural ou submersa
XS3	Zonas de marés, de rebentação ou de salpicos	25000	IV – Muito forte	Industrial ou respingos de maré

Fonte: Andrade & D'andrea (2010); Andrade (2014); Medeiros Jr. (2014) e NBR 6118 (2014)

Santos (2006) realizou ensaios acelerados de corrosão, identificando o t_i (tempo de iniciação) para os traços ensaios e calculou o fator k_{Cl} com base na Equação 5, porém desconsiderando o fator de idade, para os cobrimentos iguais 10 e 20 mm. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 10. Segundo o autor, como a condição de exposição utilizada nos ensaios de corrosão acelerada foi a mesma para todos os corpos de prova analisados, esperava-se que os valores de k_{Cl} obtidos fossem semelhantes para todas as misturas. No entanto, os resultados variaram em função dos traços e das espessuras de revestimento utilizadas.

Tabela 10 – Valores de k_{Cl} para traços com CII-F e adição de sílica ativa

Nome	$C_{sílica\ ativa}$ (kg/m^3)	$C_{cimento}$ (kg/m^3)	Tipo de cimento	Relação água/cimento	k_{Cl} ($cm^3.\Omega/dia$)		k_{Cl} ($cm^3.\Omega/ano$)	
					10 mm	20 mm	10 mm	20 mm
SA – 0,4	53,2	478,9	CII – F	0,44	3,13E-04	4,55E-04	0,08	0,17
P – 0,4	-	532,1		0,4	2,63E-03	1,66E-03	0,70	0,61
SA – 0,5	53,3	479,4		0,56	7,52E-03	3,41E-03	1,99	1,24
P – 0,5	-	532,6		0,5	7,44E-03	3,04E-03	1,97	1,11

Fonte: Santos (2006)

É possível observar que os valores de k_{Cl} obtidos por Santos (2006) foram muito distintos dos propostos por Andrade & D'Andrea (2010). Isso pode ter

ocorrido por Santos (2006) ter calculado os fatores ambientais com base em ensaios acelerados, com resultados de iniciação de corrosão em dias, enquanto Andrade & D'Andrea (2010) propuseram valores de k_{Cl} para estruturas reais, sem aceleração da corrosão. Ressalta-se também, que Santos (2006) não levou em consideração o fator de idade, que aumentaria o valor de k_{Cl} .

2.3.3. Fator de reação de cloretos (r_{Cl})

Conforme já exposto anteriormente, os íons cloreto se combinam quimicamente com o C_3A e C_4AF (produtos da hidratação do cimento) formando cloroaluminatos (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997; PEREIRA & CINCOTTO, 2001; HOPPE FILHO *et al.*, 2013). Assim, quando há contaminação por cloretos, nem todos os íons ficam disponíveis para corroer a armadura. O efeito dessa reação dos cloretos é introduzido no modelo de Andrade (2004) através do fator r_{Cl} , que é responsável pelo retardamento da penetração de agentes agressivos.

O fator de reação ou de retardo representa o número de vezes que a resistividade efetiva é aparentemente aumentada pela reação com o agente agressivo e pode ser calculada através dos coeficientes de difusão no estado estacionário e não estacionário e da porosidade do concreto, conforme apresentado na Equação 8 (ANDRADE, 2014).

$$r_{Cl} = \frac{D_{ef}}{D_{ap} \cdot \varepsilon} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

r_{Cl} : fator de reação de cloretos;

D_{ef} : coeficiente de difusão efetivo ou coeficiente de difusão no estado estacionário (cm^2/ano);

D_{ap} : coeficiente de difusão aparente ou coeficiente de difusão no estado não estacionário (cm^2/ano);

ε : porosidade (%).

O fator de reação de cloretos, ou seja, a capacidade de fixação de cloretos depende tanto do consumo de cimento, quanto de sua composição química (ANDRADE & D'ANDREA, 2010; ANDRADE *et al.*, 2013). Provavelmente, quanto maior for a quantidade de aluminatos disponíveis para reagir com os íons cloreto, maior será a capacidade de fixação do cimento. A Tabela 11 apresenta valores recomendados por Andrade & D'Andrea (2010) e Andrade *et al.* (2013) de fatores de reação de cloretos por tipo de cimento.

Tabela 11- Valores recomendados para r_{Cl}

Tipo de cimento	Tipo de cimento brasileiro equivalente	r_{Cl}	Desvio padrão	Fonte
I	CP I (sem adições)	1,5 – 2 ⁽¹⁾	-	Andrade <i>et al.</i> (2013)
		1,9	1,3	Andrade & D'Andrea (2010)
I + sílica ativa	CP I com adição de sílica ativa	1,5	0,5	Andrade & D'Andrea (2010)
II A e III	CPII (com adição de pozolana, escória de alto forno ou fíler) e CPIII (cimento Portland de alto forno)	3,0 – 5,0	-	Andrade <i>et al.</i> (2013)
II A	CPII (com adição de pozolana, escória de alto forno ou fíler)	3,0	2,1	Andrade & D'Andrea (2010)
II + pozolanas + sílica ativa	CPII com adições	1,5 - 4	-	Andrade <i>et al.</i> (2013)

(1) Segundo Andrade *et al.* (2013), este valor depende do teor de aluminatos no cimento e da relação água/cimento

Fonte: Andrade & D'Andrea (2010) e Andrade *et al.* (2013)

Medeiros Jr. (2014) determinou fatores de reação de cloreto para as relações água/cimento igual a 0,4, 0,5 e 0,6 para os cimentos brasileiros CPII-F, CPIII, CPV e CPV. O autor identificou que o r_{Cl} foi mais afetado pelo tipo de cimento do que pela variação da relação a/c. Como pode ser observado na Tabela 12, os valores dos fatores de reação de cloretos crescem na seguinte sequência: CPIII RS, CPV, CPV ARI, CPII-F. Ou seja, dentro os cimentos ensaiados por Medeiros Jr. (2014), o que teve a maior capacidade de fixar cloretos foi o CPII-F, enquanto o CPIII RS foi o que menos combinou cloretos.

Tabela 12 – Fatores de reação de cloreto para cimentos brasileiros

Tipo de cimento	Relação água/cimento	r_{Cl}	Desvio padrão
CP II-F	0,4	3,72	0,556
	0,5	3,94	0,12
	0,6	4,05	0,65
CPIII RS	0,4	1,31	0,02
	0,5	1,36	0,12
	0,6	1,41	0,14
CPIV	0,4	1,73	0,35
	0,5	1,92	0,30
	0,6	1,97	0,30
CPV-ARI	0,4	3,38	0,36
	0,5	3,47	0,36
	0,6	3,50	0,45

Fonte: Medeiros Jr. (2014)

Segundo Medeiros Jr. (2014), os valores dos fatores de reação de cloretos terem crescido na sequência CPIII RS < CPIV < CPV ARI < CP II-F é explicado pelo fato de o cimento CP III utilizado na pesquisa ser resistente a sulfatos e, portanto, ter o teor de C_3A é limitado a 8% pela NBR 5737 (1992). Além disso, tanto o CPIII RS quanto o CPIV possuem alto teor de adições e, portanto, menor porcentagem de clínquer e, após a hidratação, de aluminatos do que os cimentos CPV ARI e CP II-F.

Santos (2006) calculou r_{Cl} para concretos com relação água/aglomerante iguais 0,40 e 0,50, para o cimento CP II-F com e sem adição de sílica ativa, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Fatores de reação de cloreto para cimento CP II-F e sílica ativa

Nome	$C_{sílica\ ativa}$ (kg/m^3)	$C_{cimento}$ (kg/m^3)	Tipo de cimento	Relação água/cimento	r_{Cl}
SA – 0,4	53,2	478,9	CP II – F - 32	0,44	1,07
P – 0,4	-	532,1	CP II – F -32	0,40	1,14
SA – 0,5	53,3	479,4	CP II – F -32	0,56	0,58
P – 0,5	-	532,6	CP II – F -32	0,50	1,25

Fonte: Santos (2006)

O fator de reação depende da capacidade de fixação de íons cloreto e isso é função da quantidade de C_3A presente no cimento e da quantidade de C-S-H formado durante a hidratação. Consequentemente a capacidade de fixação é

influenciada pelo tipo e quantidade de cimento utilizado e pelo teor de adições minerais empregadas em substituição ao cimento ou ao clínquer (tanto na produção do concreto quanto na fabricação do cimento). Portanto, na pesquisa de Santos (2006) eram esperados valores próximos entre si para os fatores de reação de cloretos, já que os traços ensaiados possuíam o mesmo consumo de aglomerante, com baixa substituição por sílica ativa (Tabela 13). Santos (2006) explica o valor destoante para o traço SA – 0,5 devido a uma falha no corpo de prova utilizado no ensaio de migração de cloretos (Figura 20).

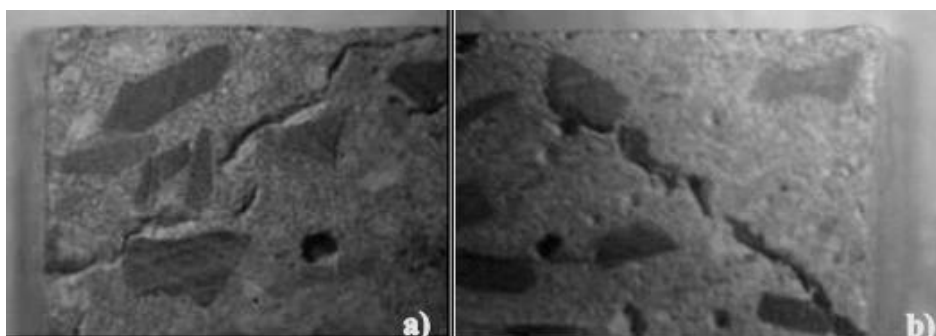


Figura 20 – Fissura presente nos corpos de prova dos traços com sílica ativa
Fonte: Santos (2006)

Comparando os fatores de reação de cloreto de Andrade *et al.* (2013), Medeiros Jr. (2014) e Santos (2006) através Tabela 14 é possível observar valores discrepantes, mesmo para consumos de cimento próximos apresentados por Medeiros Jr. (2014) e Santos (2006).

Tabela 14 – Comparativo entre fatores de reação de cloreto

Tipo de cimento	Relação água/cimento	r_{Cl}	$C_{cimento}$ (kg/m ³)	Fonte
CP II	0,4	3,72	498	Medeiros Jr. (2014)
	0,5	3,94	474	
	0,6	4,05	453	
	0,4	1,13	532	Santos (2006)
	0,5	1,25	532	
	Não especificado	3,0 – 5,0	Não especificado	Andrade <i>et al.</i> (2013)
CPIII	0,4	1,31	498	Medeiros Jr. (2014)
	0,5	1,36	474	
	0,6	1,41	453	
	Não especificado	3,0 – 5,0	Não especificado	Andrade <i>et al.</i> (2013)
CPII + sílica ativa	0,44	1,07	479	Santos (2006)
	0,56	0,58	479	
	Não especificado	1,5 - 4	Não especificado	Andrade <i>et al.</i> (2013)

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta pesquisa propõe analisar a modelagem da vida útil através da resistividade elétrica superficial (RES) de concretos com adições pozolânicas e expostos a íons cloreto. Para isso, foram moldados os traços descritos na Tabela 15, sendo:

- TCPV: traço referência composto com cimento CPV ARI sem adições;
- TCPII: traço composto com cimento CPII-Z-32, substituindo totalmente o CPV ARI;
- TCPIV: traço composto com cimento CPIV-32, substituindo totalmente o CPV ARI;
- TSA: traço composto com sílica ativa, substituindo parcialmente o CPV ARI;
- TSCA: traço composto com sílica de casca de arroz, substituindo parcialmente o CPV ARI;
- TM: traço composto com metacaulim, substituindo parcialmente o CPV ARI;
- TCV10: traço composto com cinza volante, substituindo em massa 10% do CPV ARI;
- TCV30: traço composto com cinza volante, substituindo em massa 30% do CPV ARI.

Tabela 15 – Traços unitários em massa

Traço	CPV	CPII-Z	CPIV	SA	CCA	M	CV	Areia	Brita 1	a/a ⁽¹⁾	Aditivo
TCPV	1,00	-	-	-	-	-	-	2,25	3,00	0,45	0,018
TCPII-Z	-	1,00	-	-	-	-	-	2,25	3,00	0,45	0,013
TCPIV	-	-	1,00	-	-	-	-	2,25	3,00	0,45	0,012
TSA	0,90	-	-	0,10	-	-	-	2,25	3,00	0,45	0,018
TSCA	0,90	-	-	-	0,10	-	-	2,25	3,00	0,45	0,013
TM	0,90	-	-	-	-	0,10	-	2,25	3,00	0,45	0,019
TCV10	0,90	-	-	-	-	-	0,10	2,25	3,00	0,45	0,017
TCV30	0,70	-	-	-	-	-	0,30	2,25	3,00	0,45	0,020

(1) Relação água/aglomerante (cimento+adições)

As porcentagens de substituição de cimento CPV – ARI por cinza volante iguais a 10 e 30% foram determinadas baseadas nos valores limites de adição de material pozolânico prescritos pela NBR 11578 – Cimento Portland Composto (1991) e NBR 5736 – Cimento Portland Pozolânico (1991), para se aproximar da composição dos cimentos CP II – Z e CP IV, utilizados no programa experimental.

Para manter a trabalhabilidade constante para todos os traços, a fim de que todos os traços fossem adensados com um mesmo padrão, a quantidade de aditivo utilizada foi variável, conforme pode ser observado na Tabela 15. Assim, o abatimento de todos os traços foi igual a 130 ± 30 mm.

Como o foco deste trabalho é a modelagem da vida útil de concreto exposto a cloretos, foi adotado o traço de referência considerando os parâmetros mais rígidos quando há cloretos descritos pela NBR 12655 (2015), referente à classe IV, conforme apresentado na Tabela 16. Portanto, os traços apresentam relação água/aglomerante igual a 0,45, consumo de cimento de 360 kg/m^3 e f_{ck} mínimo de 40 MPa.

Tabela 16 – Classe de agressividade e parâmetros para garantia da qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq \text{C20}$	$\geq \text{C25}$	$\geq \text{C30}$	$\geq \text{C40}$
	CP	$\geq \text{C25}$	$\geq \text{C30}$	$\geq \text{C35}$	$\geq \text{C40}$
Consumo de cimento Portland por metro cúbico (kg/m^3)	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

CA: Componentes e elementos estruturais de concreto armado
 CP: Componentes e elementos estruturais de concreto protendido

Fonte: NBR 12655 (2015)

Para todos os traços citados, foram realizados ensaios de resistência à compressão, absorção por imersão e absorção por capilaridade. Conforme descrito anteriormente, o modelo de vida útil proposto por Andrade (2004) tem como parâmetros a resistividade elétrica superficial, a porosidade, o fator de reação de cloretos (avaliado pelo coeficiente de difusão de cloretos) e as características do ambiente a que a estrutura será exposta. Portanto, essas características também foram avaliadas nesta pesquisa para cada traço especificado anteriormente. Os experimentos estão detalhados na sequência

deste trabalho e o esquema do programa experimental principal está exposto na Figura 21.

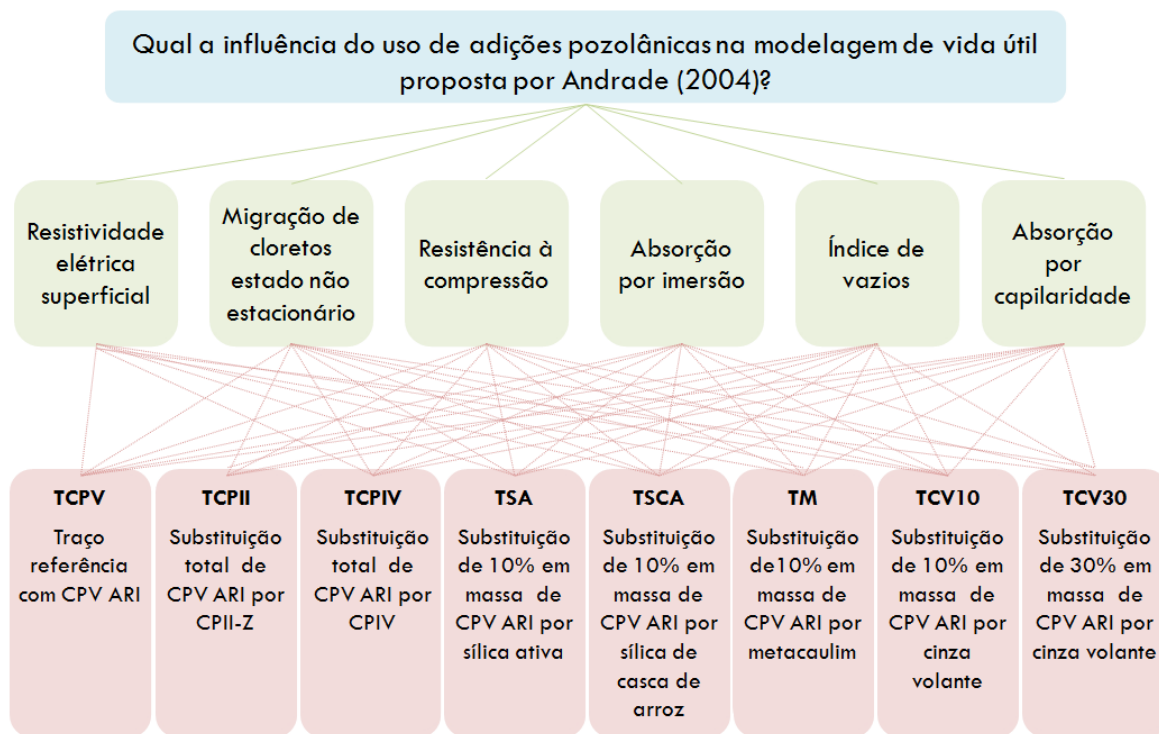


Figura 21 – Esquema do estudo principal

Como estudo secundário, foram realizadas mais duas investigações em relação a resistividade elétrica do concreto. Como no estudo principal foram utilizados percentuais diferentes de aditivo para igualar a trabalhabilidade de todos os traços, a primeira investigação do estudo secundário teve intenção de avaliar a influência do teor de aditivo na resistividade elétrica superficial. Para isso foram moldados corpos de prova do traço TCPV (traço referência) com as seguintes porcentagens de aditivo em relação à massa de cimento: 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2 e 2,25% e a RES foi avaliada aos 7, 28 e 56 dias. Não foi possível avaliar a resistividade sem o uso de aditivos pois para relação água/cimento adotada, igual a 0,45, o concreto não apresentou trabalhabilidade suficiente para moldagem dos corpos de prova.

A segunda investigação secundária em relação à resistividade elétrica foi realizada para avaliar o efeito do teor de cloretos no concreto. O modelo de vida útil proposto por Andrade (2004) considera a relação entre os íons cloreto e o concreto através do fator de reação de cloretos, que representa a combinação

dos íons cloreto ao cimento e a formação de sal de Friedel. Ainda não há um consenso da influência do teor de cloretos na RES do concreto, conforme já exposto na revisão bibliográfica, item 2.2.7. Entretanto, os cloretos que não são combinados, por serem íons, podem contribuir para aumentar a condutividade e, conseqüentemente reduzir a resistividade elétrica. O modelo de Andrade (2004) não considera essa possível redução na RES devido à presença de cloretos livres.

Assim, com o intuito de avaliar esse fato e verificar a necessidade de um fator que considere a redução da RES pela presença de íons cloreto na solução dos poros, foram moldados corpos de prova com um traço padrão sem a presença de aditivos com os seguintes teores de cloreto em relação à massa de cimento: 0, 1, 2, 3 e 4%. Os traços utilizados no estudo principal são diferentes dos aplicados nesta etapa da pesquisa, que estão apresentados na Tabela 17, porque os ensaios para avaliação do efeito do teor de cloretos foram realizados antes da definição dos traços do estudo principal. O abatimento de tronco de cone utilizado foi igual a 130 ± 30 mm e o consumo de cimento igual a 348 kg/m^3 . Os materiais componentes utilizados foram os mesmos para todos os concretos produzidos nesta pesquisa e serão descritos na sequência deste trabalho. Para adicionar cloreto ao concreto fresco foi utilizado NaCl. A resistividade elétrica foi avaliada aos 28, 63 e 91 dias.

Tabela 17 – Traços para avaliação da influência do teor de cloretos na RES

Traço	CP V - ARI	Areia	Brita 1	Água	Cloreto
0%	1	2,12	2,88	0,59	0,00
1%	1	2,12	2,88	0,59	0,01
2%	1	2,12	2,88	0,59	0,02
3%	1	2,12	2,88	0,59	0,03
4%	1	2,12	2,88	0,59	0,04

3.1. VARIÁVEIS DE ESTUDO

As variáveis de resposta ou variáveis dependentes do experimento são os aspectos que podem ser medidos e que permitem quantificar as características de qualidade desejadas (RIBEIRO & CATEN, 2003). As variáveis independentes são

fixadas com o objetivo de avaliar a influência nas variáveis de resposta (MEDEIROS, 2008). A unidade de análise deste trabalho é a modelagem da vida útil do concreto com adições pozolânicas e diferentes tipos de cimento expostos aos íons cloreto. Desse modo, seguem as listas das variáveis deste estudo:

- Variáveis independentes:
 - Os tipos de adições pozolânicas, com substituição parcial de 10% do cimento, mais a série de referência com CP V ARI (5 níveis);
 - Teor de cinza volante (dois teores) mais a série de referência com CP V ARI (3 níveis);
 - Os tipos de cimentos utilizados: CP V ARI, CP II Z e CPIV (3 níveis);
 - Teor de aditivo superplastificante (8 teores, 8 níveis);
 - Teor de cloretos (5 teores, 5 níveis).
- Variáveis dependentes:
 - Resistividade elétrica superficial do concreto;
 - Porosidade do concreto;
 - Resistência à compressão;
 - Absorção de água por imersão;
 - Absorção de água por capilaridade;
 - Coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário;
 - Fator de reação de cloretos;
 - Fator de idade;
 - Vida útil estimada.

Os ensaios foram realizados baseados em normas nacionais, internacionais e em procedimentos descritos na literatura. Após a coleta dos resultados, para as situações em que o coeficiente de variação foi superior a 10%, os valores espúrios (que se distanciaram da média em uma vez o desvio-padrão) foram eliminados. Em seguida, foi realizado o tratamento estatístico dos dados, através de uma análise de variância (ANOVA), a fim de comparar, com 95% de significância, se os parâmetros ensaiados são significativamente iguais ou não. Ou seja, foi possível identificar se os traços avaliados garantiram diferentes níveis de vida útil estimadas quando expostos a um ambiente com cloretos.

3.2. MATERIAIS

Neste capítulo estão descritos os materiais a serem utilizados no programa experimental.

3.2.1. Cimentos

Segundo o Relatório Anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2012), o cimento mais produzido no Brasil de 2007 a 2012 foi o CP II, seguido do CP III e CP IV (Figura 22). Dentre esses tipos citados, as indústrias paranaenses (Cimento Itambé e o Grupo Votorantim) produzem apenas os cimentos CP II e CP IV e, portanto, esses aglomerantes foram selecionados para esta pesquisa. Também produzido pelas empresas apontadas e devido ao seu baixo teor de adição (até 5% de fíler calcário em relação à massa de clínquer), o cimento CPV ARI foi escolhido para o traço de referência.

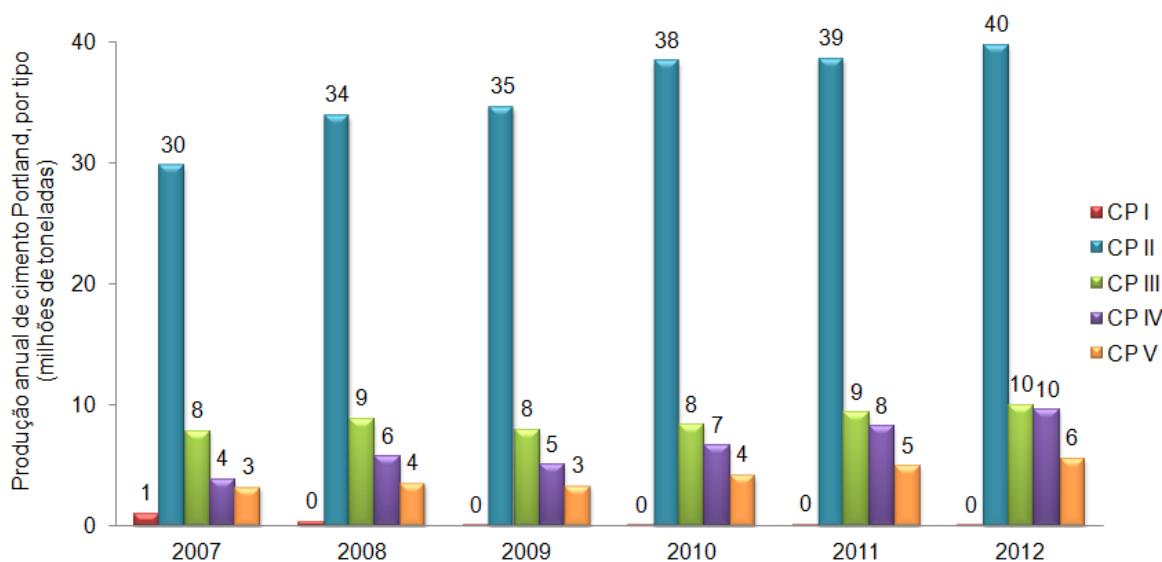


Figura 22 – Produção de cimento no Brasil de 2007 a 2012

Fonte: SNIC (2012)

As características físicas dos cimentos utilizados estão expostas na Tabela 18 e as químicas na Tabela 19.

Tabela 18 – Características físicas dos cimentos

Cimentos	Massa específica (g/cm ³)	Tempo de pega		Blaine (m ² /g)	Resistência à compressão (MPa)				Observação
		Início	Fim		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
CP II-Z-32	2,96	03h25	04h03	0,372	12,1	26,5	32,7	41,4	Adição de 6 a 14% de pozolana
CP IV-32	2,83	03h49	04h33	0,433	15,2	29,5	35,8	45,1	Adição de 15 a 50% de pozolana
CP V-ARI	3,12	02h47	03h23	0,406	22,0	37,9	43,3	51,6	Adição de até 5% de fíler calcário

Fonte: Fabricante (2014)

Tabela 19 – Características químicas dos cimentos

Amostras	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Perda ao fogo (%)	CaO livre (%)	Resíduo insolúvel (%)	Equivalente alcalino (%)	Teor de C ₃ A ⁽¹⁾
CPII-F-32	6,8	22,72	3,09	53,23	3,9	2,8	5,06	0,68	12,75	0,79	12,8%
CPIV-32	9,79	29,14	3,73	45,34	3,17	2,43	3,27	0,72	25,73	1,03	19,6%
CPV ARI	4,33	18,66	2,63	60,64	4,83	2,85	2,89	0,92	0,66	0,61	7,0%

(1) Cálculo do teor de C₃A (item 5.1.3 - NBR 5737/1992): $(C_3A) = 2,65*(Al_2O_3) - 1,692*(Fe_2O_3)$

Fonte: Fabricante (2014)

3.2.2. Adições pozolânicas

A análise química das adições pozolânicas sílica ativa, cinza de casca de arroz e metacaulim foi realizada através da fluorescência de raios X, a massa específica conforme prescrito na NBR NM 23/01 e área específica Blaine de acordo com a NBR NM 76/98. Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Características físicas e atividade pozolânica das adições empregadas

Adições minerais	Massa específica (g/cm ³)	Chapelle modificado NBR 15895 (mg Ca(OH) ₂ /g amostra)
Cinza volante	2,20	408
Metacaulim	2,50	1193
Sílica ativa	2,18	1542
Sílica de casca de arroz	2,12	1336

As adições podem ser consideradas pozolânicas quando o consumo de CaO é superior a 330mg CaO/g pozolana e, por estequiometria, esse valor corresponde a 436mg Ca(OH)₂/g pozolana. Assim, observando os valores expostos na última coluna da Tabela 20, é possível afirmar que a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim apresentam elevado consumo de hidróxido de cálcio, e são, portanto, consideradas pozolanas de alta reatividade. Todas as adições foram submetidas ao ensaio de índice de atividade pozolânica com cal (NBR 5751/2012) e com cimento (NBR 5752/2012) e foram classificadas como materiais com atividade pozolânica. A composição química das adições está apresentada na Tabela 21.

Tabela 21 – Análise química por fluorescência de raios X das adições minerais

Adições minerais	Composição Química (%)								
	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	MgO
Cinza volante	57,8	3	6,2	1,6	26,3	0,1	1,3	0,3	0,8
Metacaulim	45,86	-	3,9	0,14	46,05	-	2,22	1,69	-
Sílica ativa	92,49	2,76	0,13	0,51	1,91	-	-	2,08	-
Sílica de casca de arroz	88,94	4,18	0,11	1,1	2,42	0,24	-	2,08	-

Para investigar a atividade pozolânica nas adições no estado anidro, foi empregada a técnica de difração de raios-X, em que foi identificado halo amorfo característico de estrutura vítrea (Figura 23). Na amostra da cinza volante foram identificados picos referentes a quartzo (SiO₂), mulita (Al₆Si₂O₁₃) e hematita (Fe₂O₃). Na sílica de casca de arroz, foram identificados picos referentes à cristobalita (SiO₂), uma das formas polimórficas do dióxido de silício, indicando haver, além da estrutura vítrea da pozolana, uma estrutura cristalina para as duas adições.

O difratograma do metacaulim apresentou picos característicos de quartzo, caulinita (Al₂.Si₂.O₅.(OH)₄) e muscovita (K.Al₂.(Al.Si₃.O₁₀).OH)₂). De acordo com Medina (2011), além das fases cristalinas, no metacaulim também há presença de uma estrutura vítrea, representada pelo halo amorfo no difratograma, constituída basicamente de sílica e alumina sem arranjo atômico característico.

A amostra de sílica ativa apresenta-se totalmente amorfa (vítrea), sem identificação de picos de fases cristalinas e com a ocorrência do halo amorfo característico de materiais pozolânicos.

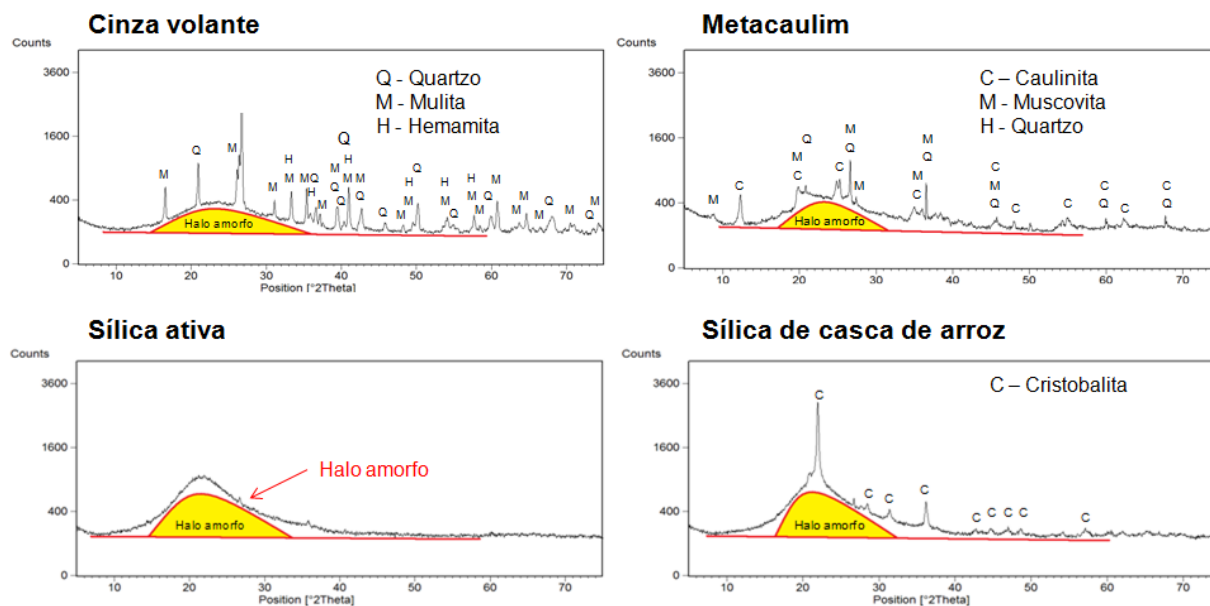


Figura 23 - Difratogramas das adições minerais pozolânicas

3.2.3. Agregados

Como agregado miúdo empregado nesta pesquisa foi utilizado areia natural com as características descritas na Tabela 22 e granulometria apresentada na Figura 24.

Tabela 22 – Características da areia natural

Areia natural	Resultado	Norma
Massa específica sss (g/cm ³)	2,63	NBR NM 52 (2009)
Massa unitária (g/cm ³)	1,54	NBR 7251 (2006)
Módulo de finura	2,34	NBR NM 248 (2001)
Teor de material pulverulento (%)	0,70	NM 46 (2003)
Impurezas orgânicas	Mais clara que a padrão	NBR 7221 (2012)

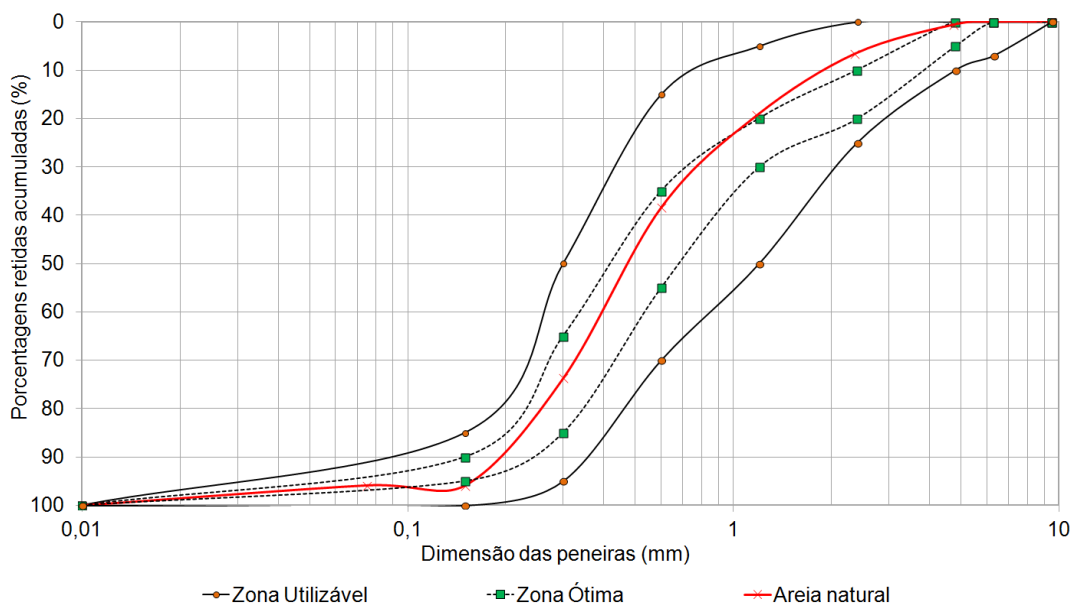


Figura 24 – Granulometria agregado miúdo

O agregado graúdo utilizado foi uma brita 1 de origem granítica e características descritas na Tabela 23 e granulometria exposta na Figura 25.

Tabela 23 – Características da brita 1

Brita 1	Resultado	Norma
Massa específica sss (g/cm ³)	2,62	NBR NM 43 (2009)
Massa específica seco (g/cm ³)	2,64	NBR NM 43 (2009)
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,61	NBR NM 43 (2009)
Massa unitária estado solto (g/cm ³)	1,47	NBR NM 45 (2006)
Massa unitária estado compactado (g/cm ³)	1,54	NBR NM 45 (2006)
DMC (mm)	19	NBR 7211 (2009)
Absorção (%)	0,4	NBR NM 43 (2009)

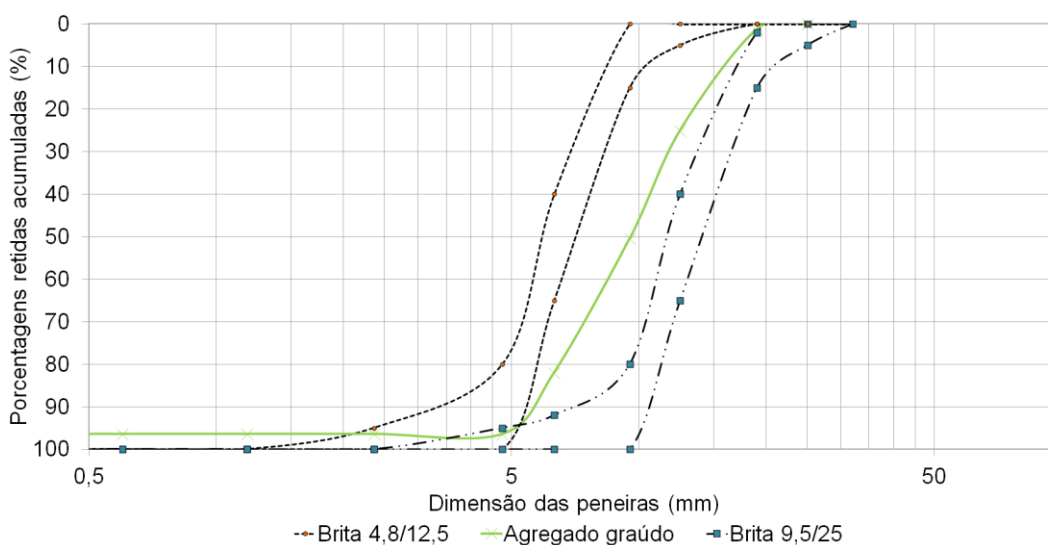


Figura 25 - Granulometria agregado graúdo

3.2.4. Aditivo

O aditivo superplastificante utilizado foi de terceira geração, pega normal, com coloração castanha e composição básica de solução de policarboxilato em meio aquoso. Este aditivo tem densidade de $1,07 \pm 0,02$ g/L, pH de $4,5 \pm 1,0$, teor de cloretos $> 0,1\%$ e teor de álcalis $< 1,0\%$.

3.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Os ensaios foram realizados aos 7, 28, 56 e 91 dias, conforme exposto na Figura 26. A resistividade elétrica foi avaliada em todas as idades citadas, enquanto a resistência à compressão e a absorção por imersão foram mensuradas aos 28 e 56 dias. Os ensaios de migração de cloretos foi realizado aos 28 dias. A absorção por capilaridade, por imersão e a porosidade foram avaliados aos 56 dias.



Figura 26 – Esquema temporal dos ensaios realizados

Foram ensaiadas 6 amostras para resistência à compressão por idade, 4 para os ensaios absorção por imersão, porosidade, absorção por capilaridade e migração de cloretos. Para avaliação da resistividade elétrica do estudo principal

e do efeito do teor de cloretos foram moldados 5 corpos de prova cúbicos e RES foi medida nas 6 faces da amostra, totalizando 30 leituras por tipo de concreto. Para avaliar o efeito do teor de aditivos, foram moldados 5 corpos de prova cilíndricos ϕ 100 x 200 mm e foram realizadas 6 leituras em cada corpo de prova, também totalizando 30 leituras por traço. Apresenta-se na Tabela 24 um resumo da quantidade de amostras por ensaio e os tipos de corpos de prova utilizados. As dimensões estão justificadas a seguir, nos textos descritivos de cada experimento. Todos os corpos de prova cilíndricos foram moldados em uma camada com um vibrador tipo agulha durante 10s. Os cubos foram concretados em duas camadas, com 5 pontos de vibração cada uma, durante 5 s cada ponto. Todas as amostras foram curadas em câmara úmida, a umidade relativa acima de 90% e temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ até o momento dos respectivos ensaios.

Tabela 24 – Quantidade, dimensões e moldagem das amostras

Ensaio	Quantidade de amostras	Corpo de prova	Dimensões
Resistência à compressão	6/idade	Cilíndrico	ϕ 100 x 200 mm
Resistividade elétrica superficial	5	Cúbico	250 x 250 x 250 mm
	5	Cilíndrico	ϕ 100 x 200 mm
Absorção por imersão	4	Cilíndrico	ϕ 100 x 200 mm
Absorção por capilaridade	4	Cilíndrico	ϕ 100 x 200 mm
Migração de cloretos estado não estacionário	4	Cilíndrico	ϕ 100 x 50 mm
Porosidade (Índice de vazios)	4	Cilíndrico	ϕ 100 x 200 mm

3.3.1. Massa específica do concreto fresco

A massa específica do concreto fresco foi determinada conforme prescreve a NBR 9833 (2009) para confirmar o consumo de cimento de cada traço ensaiado a partir da Equação 9.

$$C_{\text{cimento}} = \frac{\gamma_{\text{concreto}}}{(1 + a + b + a/c + ad)}$$

Equação 9

Onde:

C_{cimento} : consumo de cimento (kg/m^3);

γ_{concreto} : massa específica do concreto fresco (kg/m^3);

a: quantidade de areia do traço unitário;

b: quantidade de brita do traço unitário;

a/c: relação água cimento;

ad: quantidade de aditivo do traço unitário.

3.3.2. Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados conforme prescreve a NBR 5739 (2007) e, portanto, foram moldados corpos de prova de diâmetro 100 mm e altura igual a 200 mm. Foram rompidas 6 amostras para cada idade ensaiada (28 e 56 dias). Após as concretagens, os corpos de prova foram protegidos com papel filme até a desforma (Figura 27) e curados em câmara úmida até o momento da ruptura (Figura 28). Para o capeamento foram utilizados discos de neoprene shore 70 confinados em suportes metálicos. A prensa utilizada foi de acionamento elétrico, carga máxima 200 tf, modelo PC200C, do fabricante EMIC.



Figura 27 – Corpos de prova recém moldados



Figura 28 – Ruptura dos corpos de prova

3.3.3. Absorção por imersão e porosidade

Os ensaios de absorção por imersão foram realizados conforme prescreve a NBR 9778 (2005). Portanto, foram moldados quatro corpos de prova de diâmetro 100 mm e altura igual a 200 mm, a fim de garantir o volume mínimo de 1500 cm³ indicado pela norma para cada amostra. Aos 56 dias, as amostras foram retiradas da câmara úmida e os corpos de prova foram secados em estufa por 72h a 105±5°C. As amostras foram esfriadas em dessecador e suas massas secas foram determinadas. Na sequência, os corpos de prova foram submergidos em água por 72h e as massas saturadas e submersas foram medidas (Figura 29).

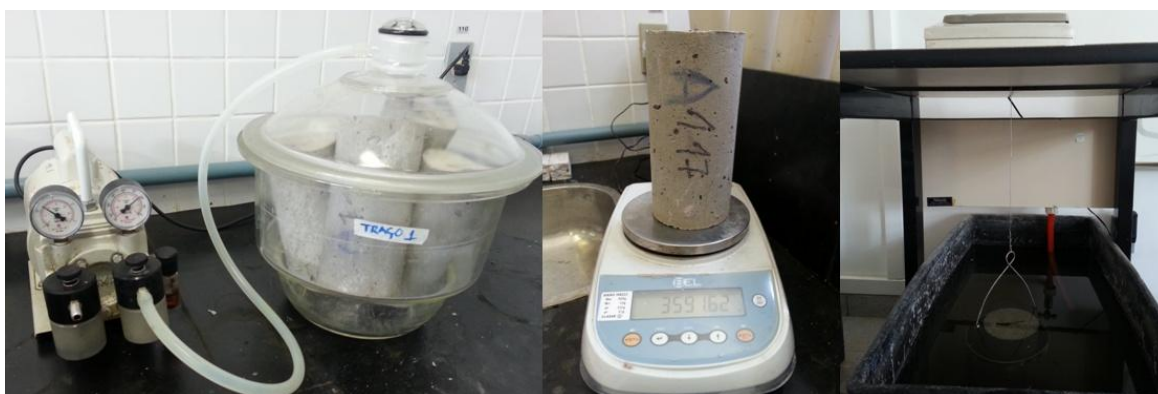


Figura 29 – Corpos de prova esfriando no dessecador e pesagem das amostras submersas

A absorção de cada amostra foi calculada a partir da Equação 10.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

A: absorção por imersão (%);

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

m_s : massa da amostra seca (g).

A porosidade foi determinada com base no índice de vazios das amostras ensaios, que foi calculado a partir da Equação 11.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad \text{Equação 11}$$

Onde m_s : massa da amostra imersa em água (g).

3.3.4. Absorção por capilaridade

A absorção por capilaridade foi ensaiada conforme prescreve a NBR 9779 (2013). Foram moldados quatro corpos de prova de diâmetro 100 mm e altura igual a 200 mm que aos 56 dias foram retirados da câmara úmida para serem secados em estufa por 72h a $105 \pm 5^\circ\text{C}$. As amostras foram esfriadas em dessecador e suas massas secas foram determinadas. Em seguida, os corpos de prova foram colocados em suportes dentro de um recipiente com água nivelada a $5 \pm 1\text{mm}$ acima da face inferior da amostra (Figura 30) e as massas saturadas foram determinadas às 3h, 6h, 12h, 24h, 48h e 72h.

Para cada tempo de medição uma absorção capilar foi calculada conforme a Equação 12.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \times 100 \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

C: absorção por capilaridade (%);

m_{sat} : massa da amostra saturada durante o período especificado (g);

m_s : massa da amostra seca (g);

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



Figura 30 – Ensaio de absorção por capilaridade

3.3.5. Resistividade elétrica

A norma espanhola UNE 83988-2: Determinación de la Resistividade Eléctrica – Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner (2012) prescreve que a resistividade elétrica superficial seja avaliada em corpos de prova cilíndricos de ϕ 100 x 200 mm ou ϕ 150 x 300 mm ou em prismáticos de 40 x 40 x 160 mm. Porém, para minimizar a influência do formato da amostra, é necessário aplicar um fator de forma, conforme descrito na Tabela 25.

Tabela 25 – Fatores de forma para diferentes tamanhos de amostras e distâncias entre eletrodos

Amostra	a = 35 mm ⁽¹⁾	a = 50 mm
Cilíndrica 300 x 150mm	0,714	0,606
Cilíndrica 200 x 100mm	0,571	0,377
Cilíndrica 150 x 75mm	0,384	-
Prismática 40 x 40 x 160 mm	0,172	-

(1) a = espaçamento entre eletrodos

Fonte: UNE 83988-2 (2012)

Assim, a fim de simular um meio semi-infinito para que não houvesse influência na resistividade elétrica superficial devido à geometria da peça de concreto, foram moldados cubos de aresta igual a 250 mm (Figura 31 e Figura 32), dimensionados com base nas recomendações de Gowers & Millard (1999), Medeiros (2001) e Lencioni & Lima (2010). Dimensões semelhantes às deste estudo já foram adotadas por outros autores (LENCIONI, 2011; MEDEIROS JR. *et al.*, 2014; MEDEIROS JR., 2014).



Figura 31 – Formas para moldagem dos corpos de prova para avaliação da resistividade elétrica



Figura 32 – Corpos de prova cúbicos para avaliar a resistividade elétrica

As leituras foram realizadas através do método dos quatro pontos, ou Eletrodo de Wenner, com espaçamento igual a 50 mm, em cada uma das faces do cubo (Figura 33). O equipamento utilizado possui frequência igual a 40 Hz e corrente variando entre 10 e 200 μA .

As amostras foram desformadas com 24 horas de idade e permaneceram em uma câmara úmida até o momento das leituras. Assim, todas as medições de resistividade elétrica foram realizadas com o concreto saturado, conforme prescreve a UNE 83988-2 (2012).



Figura 33 – Aplicação do eletrodo de Wenner

Apenas para avaliar a influência do teor de aditivos na resistividade elétrica do concreto, foram moldados 5 corpos de prova cilíndricos ϕ 100 x 200 mm. Foram realizadas 6 leituras por corpo de prova, com espaçamento entre eletrodos igual a 50 mm e foi aplicado o fator de forma conforme a Tabela 25, já que o objetivo era avaliar a variação entre os traços e não a resistividade elétrica em si.

3.3.6. Migração de cloretos

O coeficiente de difusão no estado não estacionário foi obtido através do método proposto por Luping & Nilsson (1992). O procedimento consiste no ensaio de migração prescrito pela ASTM C 1202 (2005) modificado e associado à aspersão de nitrato de prata. O experimento foi realizado com fatias de diâmetro igual a 100 mm e espessura de 50 mm extraídas de corpos de prova cilíndricos ϕ 100 x 200 mm (Figura 34). Após a selagem das laterais das amostras com silicone, essas foram colocadas em um dessecador com aplicação de vácuo por 3 horas. Em seguida, as fatias foram saturadas, através de submersão em água destilada por 18 horas (Figura 35).

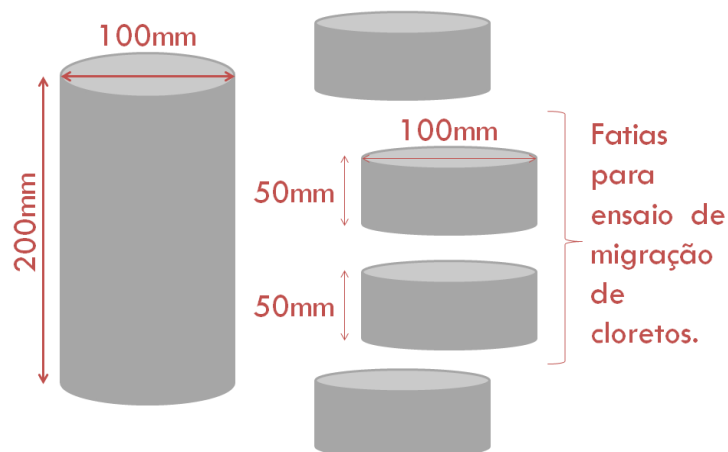


Figura 34 - Esquema da extração de amostras para o ensaio de migração de cloretos



Figura 35 – Processo de saturação das fatias de concreto para o ensaio de migração

Em um lado da célula de acrílico, foi introduzida uma solução de 3 % de NaCl, enquanto do outro lado, foi utilizada uma solução de 0,3N NaOH (Figura 36).

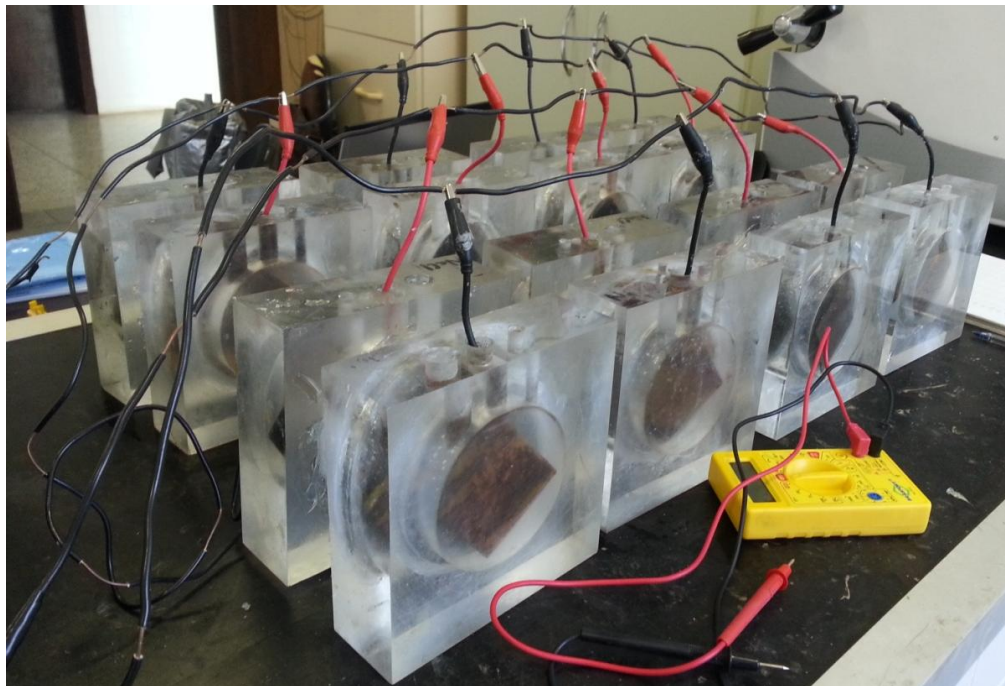


Figura 36 – Células do ensaio de migração de cloretos

A ASTM C 1202 (2005) prescreve que seja aplicada uma diferença de potencial (ddp) de 60 V durante 6 horas, medindo-se a corrente passante a cada 30 minutos, enquanto Luping & Nilsson (1992) sugerem uma ddp igual a 30 V, a fim de evitar a elevação da temperatura durante o ensaio, que poderia modificar a velocidade de difusão dos íons cloretos. Essa diferença de potencial mais baixa também já foi aplicada com sucesso por Hoppe Filho *et al.* (2013), Medeiros & Helene (2009) e Medeiros *et al.* (2009). Andrade *et al.* (2000) testaram uma ddp igual a 12 V durante 30 horas e também obtiveram resultados satisfatórios quando comparados aos resultados obtidos no ensaio difusão natural. Optou-se neste trabalho por utilizar a ddp igual a 30 V, durante 12 horas com acompanhamento da corrente passante, por ser a recomendação do trabalho de Luping & Nilsson (1992), propositores do método de ensaio que foi empregado, e por mais 12 horas para possibilitar a leitura da profundidade de penetração de cloretos e posterior cálculo do coeficiente de difusão no estado não estacionário (Figura 37).

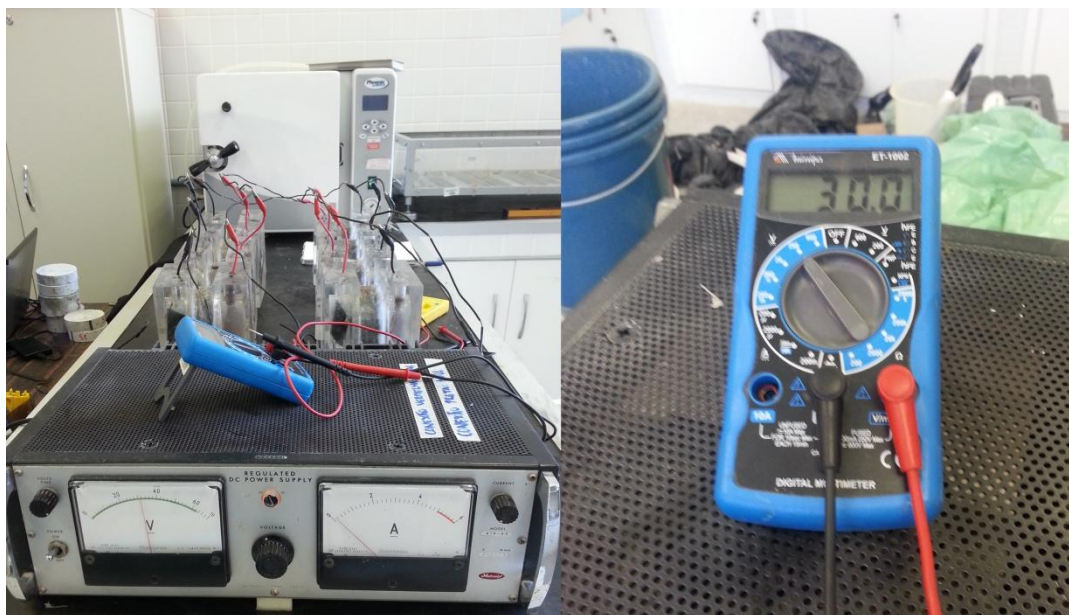


Figura 37 – Ensaio de migração de cloretos

Após o ensaio de migração, as fatias de concreto foram partidas ao meio (Figura 38) e foi avaliada a profundidade de penetração de cloretos livres através da aspersão de nitrato de prata. Esse procedimento já foi adotado em outras pesquisas (MEDEIROS, 2008; TRINDADE, 2011; MARRIAGA & CLAISSE, 2011; MARCONDES, 2012) e consiste em borrifar uma solução aquosa de AgNO_3 0,1 M na superfície do concreto. Isso causa formação de duas regiões bem definidas (Figura 39): uma esbranquiçada com precipitação de AgCl , indicando a presença de cloretos, e outra marrom, que corresponde à região com cloretos combinados ao concreto ou livre de cloretos (REAL *et al.*, 2014b). A Figura 40 apresenta a precipitação de AgCl para os traços ensaiados nesta pesquisa.



Figura 38 – Ruptura ao meio das fatias do ensaio de migração



Figura 39 - Precipitação branca de cloretos livres e região livre de cloretos em marrom
Fonte: Medeiros *et al.* (2009)



Figura 40 – Indicação da região com cloretos livres para os traços ensaiados

Para se obter o coeficiente de difusão aparente, aplica-se a expressão proposta por Luping & Nilsson (1992), exposta na Equação 13.

$$D_{ap} = \frac{RT}{z \cdot F \cdot E} \cdot \frac{x_d - a \cdot x_d^b}{t} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

D_{ap} : coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário (cm^2/s);

R: constante dos gases (1,9872 cal/mol.K);

T: temperatura (K);

z: valência do íon cloreto (-1);

F: constante de Faraday (23060 cal/Veq);

E: campo elétrico (-300 V/m);

x_d : profundidade de penetração de cloretos (m);

a e b: constantes (a = 1,061 e b = 0,589);

t: tempo de ensaio (s).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo desta pesquisa é avaliar a influência do uso das adições pozolânicas cinza volante, metacaulim, sílica ativa e sílica de casca de arroz na modelagem de vida útil proposta por Andrade (2004) baseada na resistividade elétrica superficial do concreto. Os materiais utilizados e os ensaios realizados foram descritos no item 3 e neste item são apresentados e discutidos os resultados e tratamentos dos dados obtidos.

4.1. MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO FRESCO

Os resultados de massa específica e o consumo de cimento calculado conforme a Equação 9 apresentada no item 3.3.1 estão expostos na Tabela 26. Conforme descrito anteriormente, o consumo de cimento dos traços utilizados nesta pesquisa seriam iguais a 360 kg/m³ e, através do ensaio, foi possível comprovar este consumo com uma variação de no máximo 4 kg/m³.

Tabela 26 – Resultado das massas específicas e consumos de cimento

Traço	Massa do recipiente + concreto fresco (kg)			Recipiente		γ_{concreto} (kg/m ³)	C_{cimento} (kg/m ³)
	m_1	m_2	$m_{\text{média}}$	Massa (kg)	Volume (m ³)		
TCV30	30,41	30,52	30,47	6,45	0,0102	2366	361
TCPIV	29,78	30,59	30,19	6,45	0,0102	2338	357
TSA	30,10	30,27	30,19	6,45	0,0102	2338	357
TSCA	30,29	30,64	30,47	6,45	0,0102	2366	362
TM	30,42	30,38	30,40	6,45	0,0102	2360	360
TC10	30,37	30,62	30,50	6,45	0,0102	2369	362
TCPII	30,37	30,33	30,35	6,45	0,0102	2355	360
TCPV	30,72	30,61	30,67	6,45	0,0102	2386	364

4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As médias dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão estão apresentadas na Figura 41. Os resultados de cada amostra ensaiada, as médias, desvios padrão e coeficientes de variação de cada traço estão apresentados na Tabela 39 do Apêndice 01 deste trabalho. Na Tabela 40 do Apêndice 01 apresentam-se os valores após a eliminação dos dados espúrios (que se distanciaram mais de uma vez o desvio padrão) para as situações em que o coeficiente de variação foi superior a 10%.

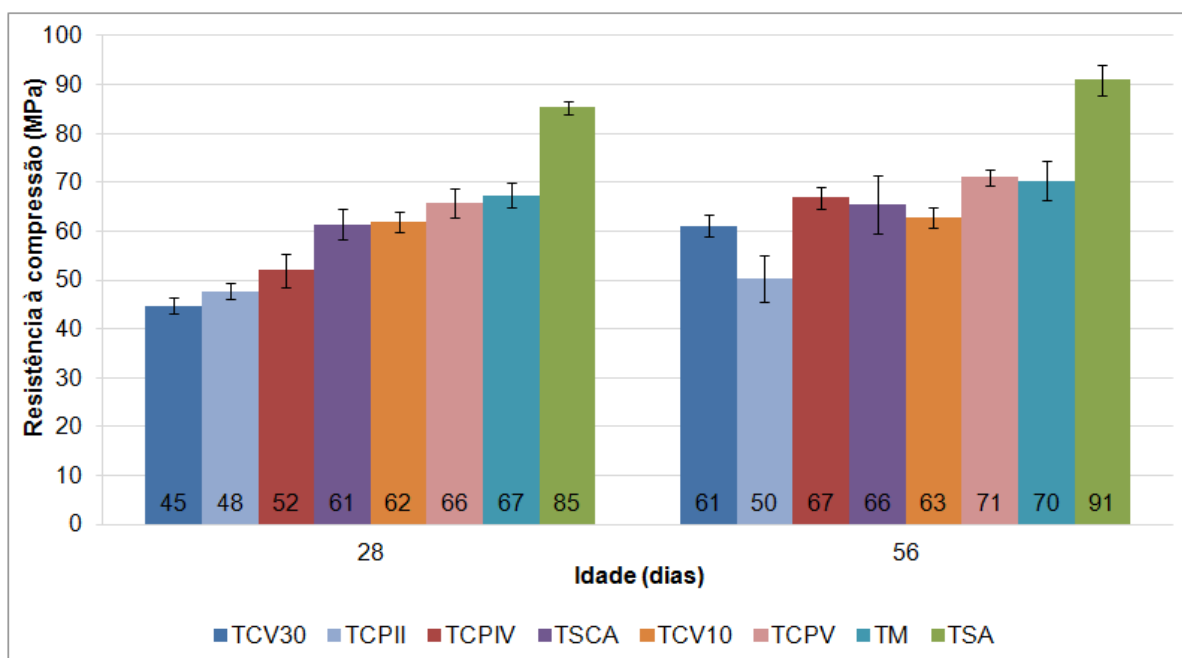


Figura 41 – Resultados médios de resistência à compressão

Através dos resultados obtidos nos ensaios foi constatado aumento da resistência à compressão ao longo do tempo para todos os traços, porém em diferentes proporções. Dos 28 aos 56 dias, o TCV30 apresentou o maior crescimento, com um ganho de 37%. Por segundo, o traço TCPIV aumentou 29% em relação à sua resistência aos 28 dias. Para o TCPV a elevação foi de 8%. As dosagens TSA e TSCA aumentaram em 7%, enquanto as misturas TCPII, TM e TCV10 ganharam 5, 4 e 1%, respectivamente. Através de uma análise de variância (ANOVA, apresentada na Tabela 27), foi possível constatar com 95% de

confiabilidade que o efeito da idade foi significativo no ganho de resistência à compressão ao longo do tempo.

Tais resultados eram esperados, já que os traços TCV30 e TCPIV são compostos por altas porcentagens de adição pozolânica e, segundo Mehta e Monteiro (2014), a velocidade de reação na presença desse material é lenta, já que a pozolana reage com o hidróxido de cálcio formado na reação de hidratação do cimento, conforme exposto anteriormente no item 3.5. Em concordância com os resultados obtidos, Medeiros Jr. *et al.* (2014) apresentaram uma variação de resistência à compressão de 100% dos 7 aos 91 dias para traço composto com cimento CPIX.

Tabela 27 – Análise de variância (ANOVA) para resistências à compressão

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Médias quadradas	F	F _{crítico}
Idade	892	1	892	48,7	4,0
Traço	108494	7	15499	846,0	2,1
Erro	1466	80	18		

Através da ANOVA também foi possível constatar o efeito significativo do traço na alteração da resistência à compressão. Aos 28 dias, a resistência à compressão cresceu na seguinte sequência: TCV30 < TCPII < TCPIV < TSCA < TCV10 < TCPV < TM < TSA. Comparando os limites de decisão do teste de Tukey (Tabela 41, APÊNDICE 02) com as diferenças entre as médias, aos 28 dias, os traços com resistências equivalentes puderam ser agrupados da seguinte forma: TCV30, TCPII e TCPIV; TSCA e TCV10, TCPV e TM; TSA, sendo que o primeiro grupo apresentou resistência 44% inferior a do traço composto com sílica ativa e o segundo grupo (no qual o concreto de referência, composto apenas por CPV-ARI se encontra) obteve resistências 25% inferiores ao traço TSA.

Aos 56 dias, houve alteração na sequência de crescimento da resistência à compressão: TCPII < TCV30 < TCV10 < TSCA < TCPIV < TM < TCPV < TSA. Através do teste de Tukey (Tabela 42, Apêndice 02), os traços puderam ser agrupados da seguinte maneira: TCPII; TCV10, TSCA, TCPIV, TM e TCPV; TSA. O primeiro grupo obteve resistência 45% inferior ao traço TSA e o segundo grupo, 27% menor.

Hoppe (2005) também obteve resultados equivalentes de resistência à compressão para traços compostos com CPV-ARI e com 35% de substituição de CPV-ARI por cinza volante ao avaliar a resistência à compressão aos 91 dias. Entretanto, para substituições de 10, 20 e 30% de CPV-ARI por cinza de casca de arroz, o autor obteve valores 13%, 26% e 16% superiores de resistência à compressão do que para o traço de referência, composto apenas por CPV-ARI. Medeiros Jr. *et al.* (2014) apresentaram resultados diferentes aos obtidos neste trabalho. Para esses autores, a resistência à compressão cresceu à medida que foram utilizados os seguintes tipos de cimento: CP IV 32, CP III 40 RS, CP II-F 32 e CP V ARI.

Silva (2011) obteve, aos 28 dias, uma redução de resistência à compressão igual 11,8% na resistência à compressão ao adicionar 8% de metacaulim em relação à massa de cimento CPV-ARI. Aos 91 dias, essa redução passou a 6,9%.

O fato de, neste trabalho, o traço TSA ter apresentado as maiores resistências à compressão do que as demais dosagens (25% acima do traço de referência aos 28 dias) pode ser explicado pelo fato de a sílica ativa ser a adição mais reativa utilizada nesse programa experimental. Conforme apresentado no difratograma da Figura 23, a sílica ativa apresentou-se totalmente amorfa (vítrea), enquanto as demais adições ensaiadas apresentaram picos de fases cristalinas. A sílica ativa também apresentou a maior atividade pozolânica (1542 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ amostra). Além disso, esse traço foi composto com cimento CPV-ARI que, conforme pode ser observado na Tabela 18, item 3.2.1, é o cimento de maior resistência à compressão (51,6 MPa), que possui alta finura (blaine igual a 0,406 m^2/g) e portanto, alta reatividade.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão indicaram influência significativa da idade e da composição do concreto (se há presença de adições ou não) nas características mecânicas do concreto, o que reforça a necessidade da consideração do progresso da hidratação do cimento na modelagem da vida útil, conforme exposto no item 4.1, referente ao fator de idade.

4.3. ABSORÇÃO POR IMERSÃO E POROSIDADE

Os resultados de cada ensaio de absorção por imersão, índices de vazios, médias, desvios padrão e coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 43 do Apêndice 03 deste trabalho. Como os coeficientes de variação para este experimento não ultrapassaram 10%, nenhum dado precisou ser eliminado. As médias dos resultados obtidos para absorção por imersão estão apresentadas na Figura 42.

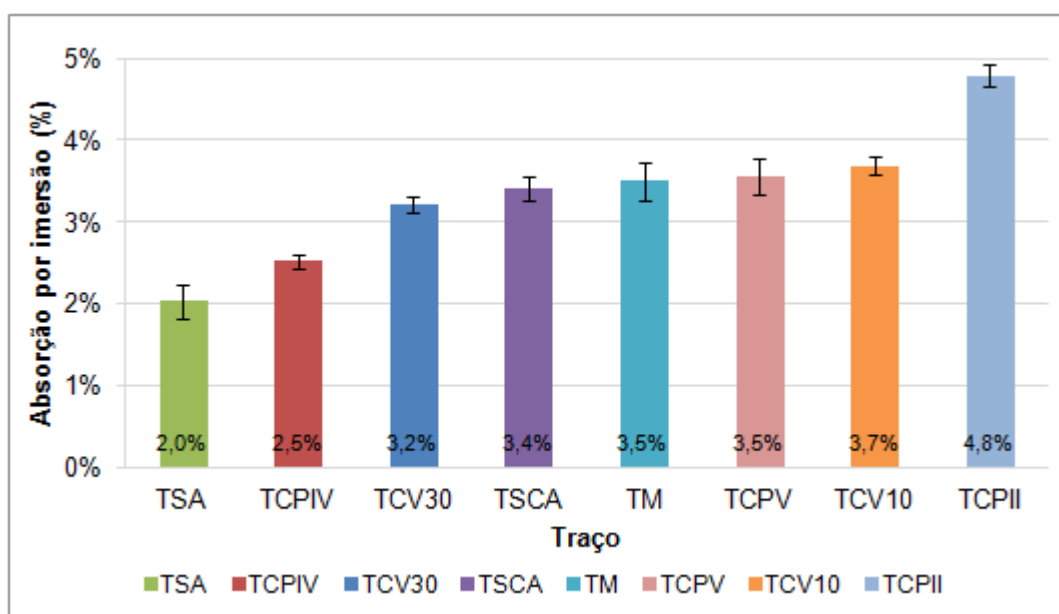


Figura 42 - Resultados médios de absorção por imersão

Apesar de as diferenças em pontos percentuais dos resultados médios do ensaio de absorção terem sido pequenas (no máximo 3 pontos percentuais), a análise de variância (Tabela 28) indicou com 95% de confiabilidade que o efeito da mudança do traço foi significativo no resultado do ensaio.

Tabela 28 - Análise de variância (ANOVA) para absorção por imersão

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Médias quadradas	F	F _{crítico}
Entre grupos (traços)	0,0	7,0	0,0	104,5	2,4
Dentro dos grupos (residual)	0,0	24,0	0,0		

O traço que apresentou a menor absorção por imersão foi o TSA, com um resultado 45% inferior ao traço de referência TCPV. Em segundo lugar, o traço TCPIV resultou em uma absorção 32% menor do que a mistura de referência. Os traços TCV30, TSCA, TM, TCPV e TCV10 apresentaram absorções equivalentes ao traço de referência, conforme pode ser observado no Teste de Tukey, apresentado na Tabela 44, Apêndice 04. A dosagem que apresentou a maior absorção foi a TCPII, com valor 30% superior a absorção do traço de referência TCPV e 140% superior ao traço TSA, que apresentou o melhor resultado.

Apesar de o traço TSA ter apresentado a menor absorção e maior resistência à compressão e do traço TCPII ter resultado no maior valor de absorção e na menor resistência, ao se correlacionar os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão com os de absorção por imersão, observa-se um baixo índice de regressão linear, igual a 0,68 (Figura 43).

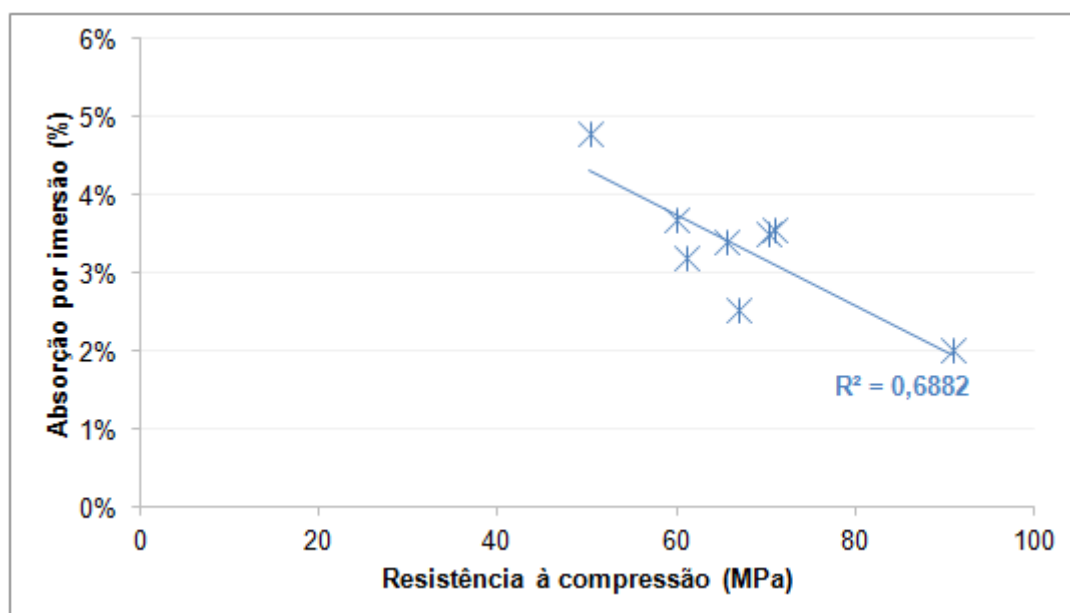


Figura 43 – Correlação entre resistência à compressão e absorção por imersão

Conforme exposto no item 3.3.3, a porosidade foi avaliada com base nos índices de vazios dos traços. As médias dos resultados obtidos para índice de vazios estão apresentadas na Figura 44 e seguiram a mesma tendência da absorção por imersão. Através da análise de variância apresentada na Tabela 29 foi possível afirmar que a mudança do traço gerou uma variação significativa entre os índices de vazios obtidos. A dosagem que apresentou o menor índice de

vazios foi a TSA, sendo 43% menor do que o traço de referência. Na sequência, o TCPIV resultou em um índice de vazios 29% menor do que TCPV. Os traços TCV30, TSCA, TM, TCPV e TCV10 apresentaram índices de vazios equivalentes segundo o Teste de Tukey (Tabela 45, Apêndice 04). A dosagem TCPII apresentou o maior índice de vazios, igual a 11%, valor 35% superior ao concreto de referência.

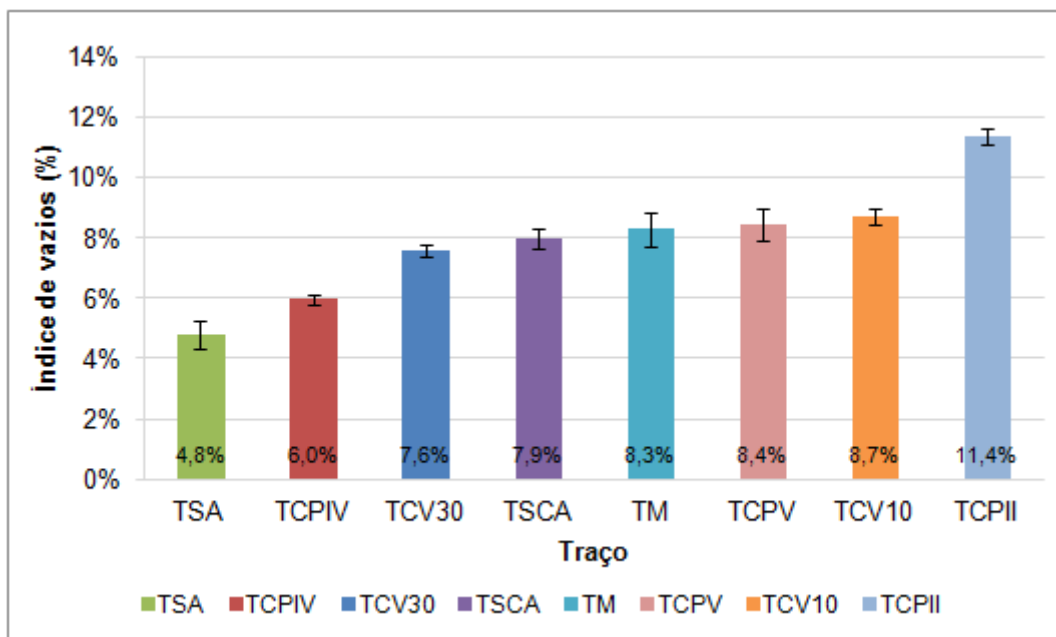


Figura 44 – Resultados médios dos índices de vazios

Tabela 29 - Análise de variância (ANOVA) para índice de vazios

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Médias quadradas	F	F _{crítico}
Entre grupos (traços)	0,0	7,0	0,0	104,8	2,4
Dentro dos grupos (residual)	0,0	24,0	0,0		

Ao se correlacionar a porcentagem de índice de vazios com a resistência à compressão também foi observado um baixo índice de correlação, igual a 0,68, conforme apresentado na Figura 45.

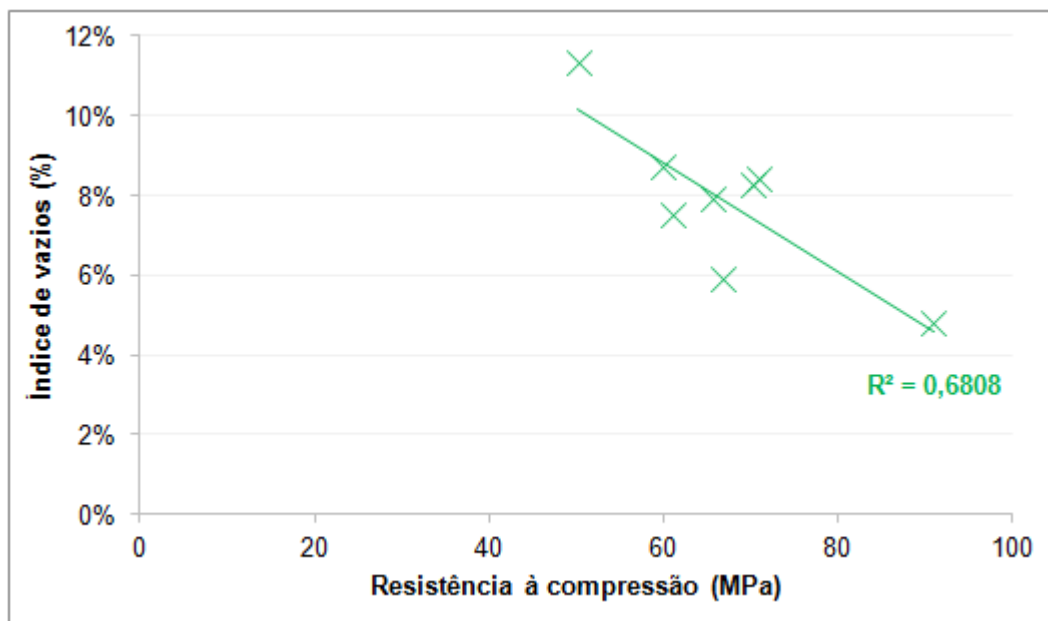


Figura 45 - Correlação entre resistência à compressão e índice de vazios

Assim como para o resultado do ensaio de resistência à compressão, é provável que o traço TSA (composto por sílica ativa) tenha apresentado os menores valores de absorção por imersão e índice de vazios por ser composto com a adição de cimento mais reativos utilizados nesta pesquisa, conforme exposto no item 6.1. Além disso, com o uso de adições pozolânicas, ocorre um refinamento e melhor distribuição do tamanho dos poros na microestrutura da pasta, o que contribui para torná-la mais densa (HOPPE, 2005). Tal fato está relacionado com a reação da adição pozolânica com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, formando o gel C-S-H (SANTOR, 2011).

Apesar de os traços TSCA, TM, TCV10 e TCV30 terem sido compostos com adições pozolânicas, a sílica de casca de arroz, o metacaulim e a cinza volante foram utilizados em substituição ao cimento Portland. Assim, provavelmente por essa substituição, houve formação de menor quantidade de gel C-S-H e de hidróxido de cálcio, e a reação pozolânica estaria compensando a quantidade de gel formada na reação. Ou seja, tanto para o traço de referência (TCPV), quanto para os traços TSCA, TM, TCV10 e TCV30, quantidades equivalentes de C-S-H teriam se formado, explicando o fato de os traços citados terem apresentados resultados equivalentes ao traço TCPV, composto sem adição mineral.

Para a dosagem TCPII foi utilizado um cimento de menor finura blaine e, portanto, menos reativo do que o traço de referência. Além disso, esse cimento possui baixo teor de adição pozolânica (no máximo 14%, conforme informações do fabricante apresentadas na Tabela 18), em substituição parcial do cimento Portland, e esse traço resultou na menor resistência à compressão aos 56 dias (Figura 41). Assim, nesta situação provavelmente houve menor formação de gel C-S-H e, por isso, o traço CPII apresentou maior índice de vazios e teor de absorção por imersão.

Em relação ao traço TCPIV, é provável que o alto teor de cinza volante presente na composição do cimento (Tabela 18) tenha contribuído para o refinamento dos poros e para o efeito microfíler (DAL MOLIN, 2011). Ou seja, a adição mineral contribui para restringir os espaços nos quais os produtos de hidratação poderiam crescer, gerando um grande número de pequenos cristais, o que levou ao concreto ter menor índice de vazios e menor absorção por imersão.

4.4. ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Os resultados dos ensaios de absorção por capilaridade, as médias, os desvios padrão e os coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 46 do Apêndice 05. Os traços em que foi necessário eliminar valores espúrios para manter coeficientes de variação igual 10% estão apresentados na Tabela 47. As médias dos resultados obtidos para absorção por capilaridade estão apresentadas na Figura 46.

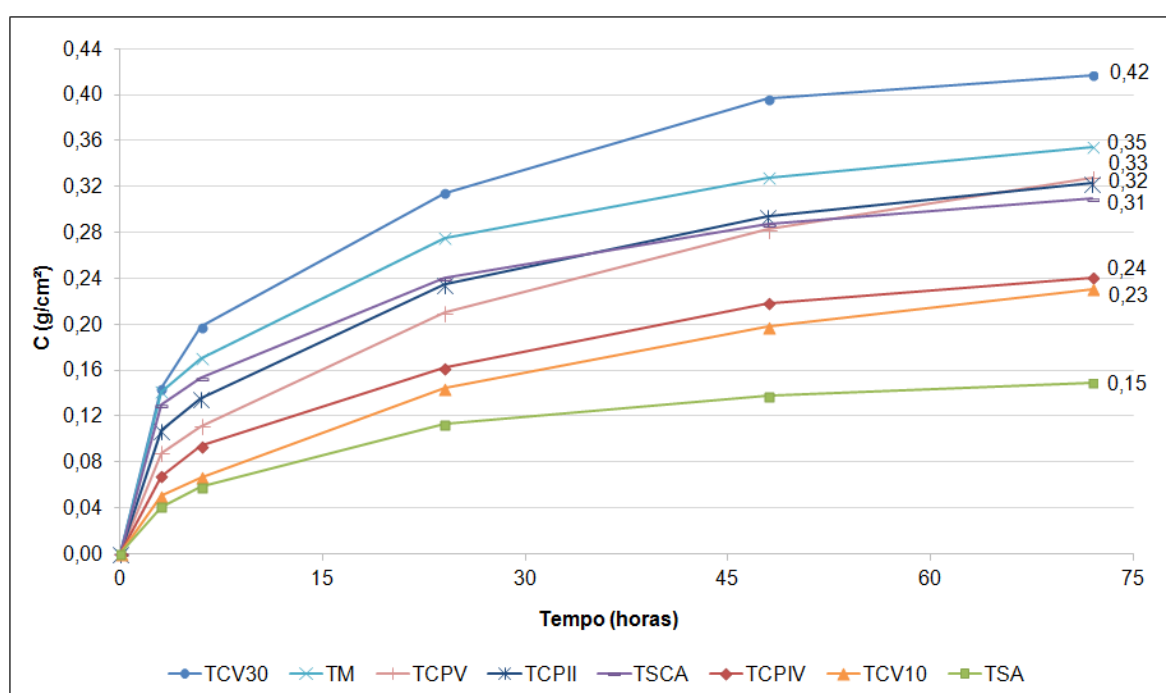


Figura 46 – Resultados médios de absorção por capilaridade

A análise de variância (Tabela 30) indicou com 95% de confiabilidade que o efeito da mudança do traço foi significativo no resultado do ensaio de absorção por capilaridade. O traço que apresentou o menor resultado foi o TSA, que às 72h de ensaio resultou em um valor 54% menor do que o traço de referência. Na sequência, os traços TCV10 e TCPIV obtiveram absorção 30% inferior ao traço TCPV. Estatisticamente equivalentes, conforme resultado do Teste Tukey apresentado na Tabela 48, Apêndice 06, os traços TSCA, TCPII, TM e TCPV (referência) apresentaram absorção por capilaridade média às 72 h igual a 0,33 g/cm². Já o traço TCV30 resultou em valor 27% maior do que a referência, com C_{72h} igual a 0,42 g/cm².

Tabela 30 - Análise de variância (ANOVA) para absorção por capilaridade

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Médias quadradas	F	F _{crítico}
Entre grupos (traços)	0,2	7,0	0,0	21,1	2,4
Dentro dos grupos (residual)	0,0	24,0	0,0		

Em concordância com os resultados apresentados, Santos (2006) encontrou valores de absorção capilar próximos a 0,1 g/cm² ao substituir 10% de cimento por sílica ativa em massa para concretos de a/c iguais a 0,40 e 0,50. Além disso, suas dosagens contendo sílica ativa apresentaram valores 52% inferiores do que o traço de referência, composto com cimento CII-F.

Comparando os valores obtidos no ensaio de absorção por imersão com os de absorção por capilaridade, observa-se que os resultados não seguiram a mesma tendência. Em ambos os ensaios o traço TSA apresentou os melhores resultados, porém, enquanto no ensaio de absorção por capilaridade a dosagem TCV30 apresentou o pior resultado (27% superior à referência), no ensaio de absorção por imersão o valor foi equivalente ao obtido pelo traço de referência. O índice de regressão linear, apresentado na Figura 47, mostra que os ensaios de absorção tiveram uma correlação de apenas 28%, indicando uma baixa relação entre os resultados.

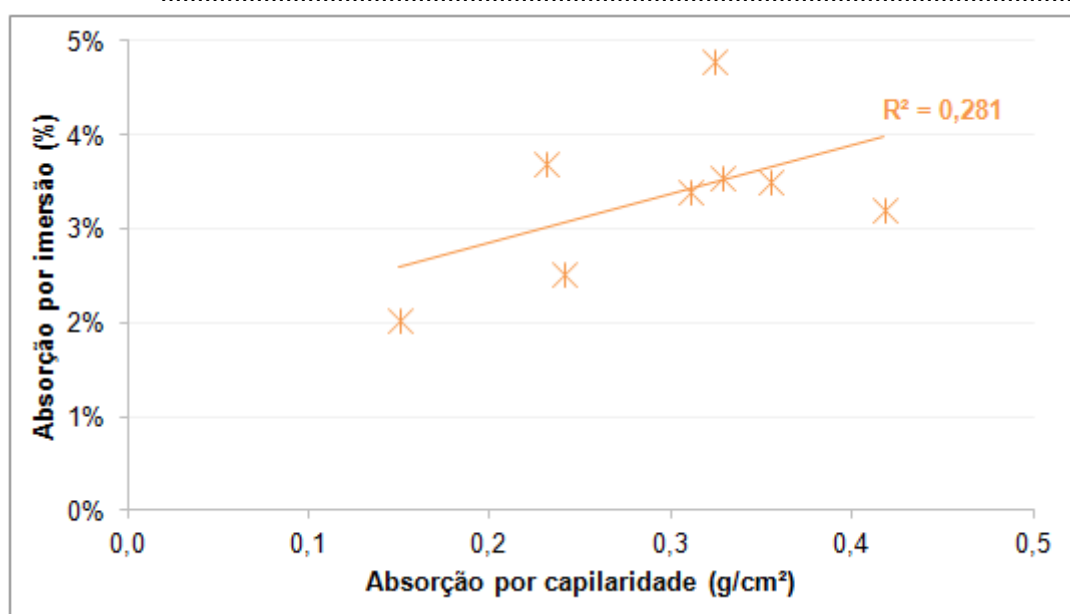


Figura 47 - Correlação entre absorção por capilaridade e absorção por imersão

Assim como o ensaio de absorção por imersão, o ensaio de absorção por capilaridade apresentou baixa correlação com a resistência à compressão (Figura 48). Ou seja, a absorção por capilaridade não reduziu conforme a resistência à compressão aumentou. Considerando que a água ingressa no concreto pelo fenômeno de sucção capilar (a água entra em contato com a superfície do concreto e é succionada para seu interior), a Figura 48 evidencia que não basta especificar um concreto mais resistente com o intuito de reduzir o ingresso de água em uma estrutura de concreto armado, uma vez que não existe uma relação efetivamente direta entre os dois parâmetros avaliados.

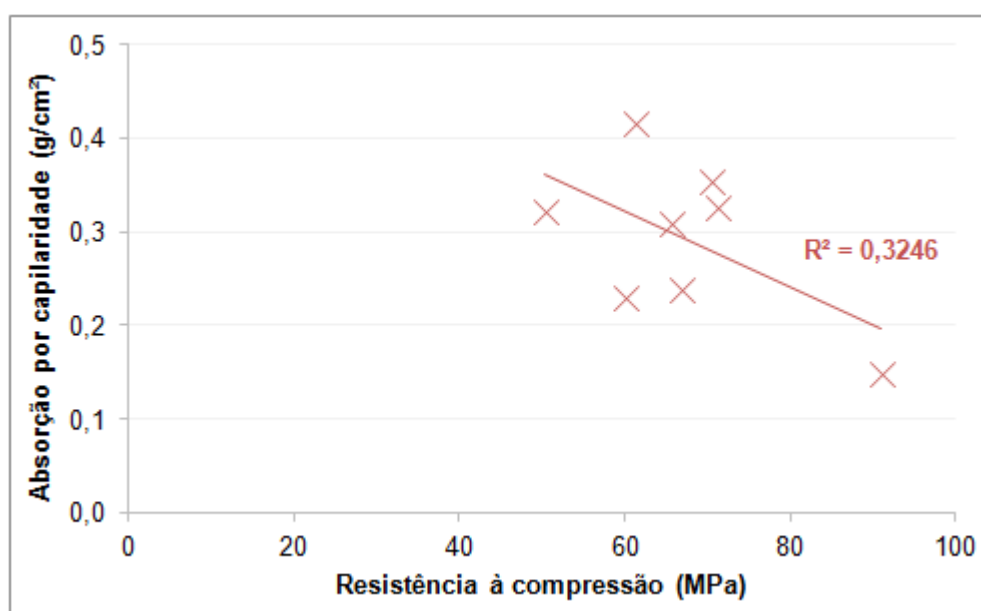


Figura 48 – Correlação entre resistência à compressão e absorção por capilaridade

4.5. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A seguir estão apresentados os resultados de resistividade elétrica para o estudo principal, que avaliou o efeito da presença de adições pozolânicas e diferentes tipos de cimento, e dos estudos secundários, relativos ao efeito da presença de aditivos e de cloretos internos na RES do concreto.

4.5.1. EFEITO DAS ADIÇÕES POZOLÂNICAS E CIMENTOS

Os resultados dos ensaios resistividade elétrica superficial para diferentes adições pozolânicas e tipos de cimento estão apresentados na Tabela 49 do Apêndice 07. As médias, os desvios padrão e os coeficientes de variação na Tabela 50 e os traços em que os valores espúrios foram eliminados estão apresentados na Tabela 51.

As médias dos resultados obtidos para resistividade elétrica superficial estão apresentadas na Figura 49. É possível observar que a RES aumentou ao longo do tempo para todos os traços estudados e, com base na análise de variância apresentada na Tabela 31, é possível afirmar com 95% de confiabilidade que o aumento da RES ao longo do tempo foi estatisticamente significativo.

Segundo os limites propostos pelo CEB 192 (1989), aos 28 dias, os traços TCPII e TCV30 enquadraram-se na faixa de alta probabilidade de corrosão, enquanto os traços TCV10, TCPV, TCPIV e TM na faixa de baixa probabilidade e os traços TSCA e TSA na faixa “negligenciável”. Já aos 91 dias, os traços TCV10 e TCPV enquadram-se na faixa de baixa probabilidade de corrosão e os demais traços foram considerados com probabilidade negligenciável.

Apesar de alguns traços terem se apresentado com igual probabilidade de corrosão, a análise de variância permitiu concluir, com 95% de confiabilidade, que houve sim influência significativa nos resultados de resistividade devido à modificação na composição dos concretos (Tabela 31).

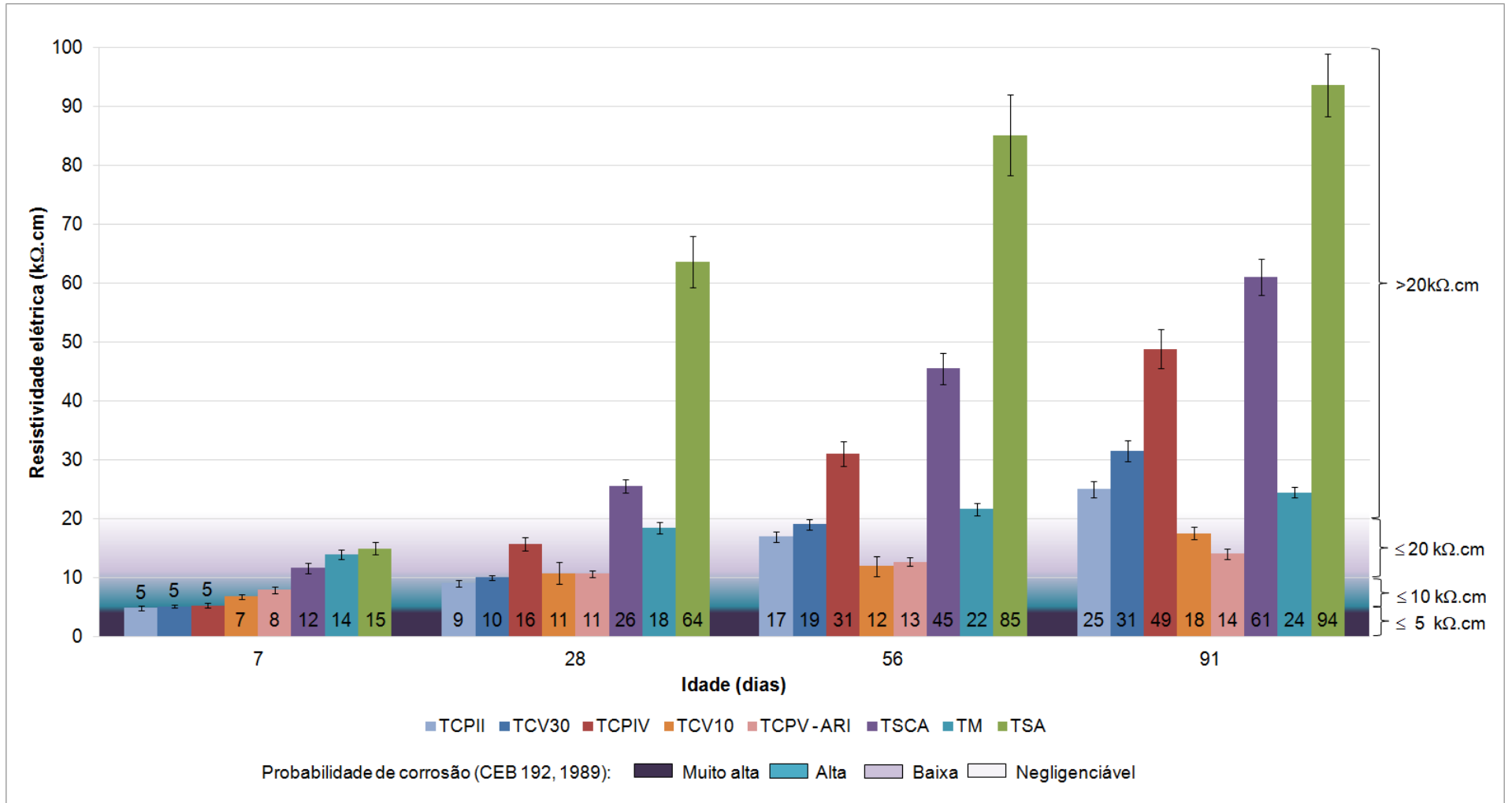


Figura 49 - Resultados médios de resistividade elétrica superficial para diferentes adições e tipos de cimento

Tabela 31 - Análise de variância (ANOVA) para resistividade elétrica superficial para diferentes adições e tipos de cimento

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Médias quadradas	F	F _{crítico}
Idade	119160	3	39720	8376	2,6
Traço	330295	7	47185	9951	2,0
Erro	4401	928	5		

De acordo com o Teste de Tukey, apresentado na Tabela 52 do Apêndice 08, aos 7 dias, os traços TCV30, TCPIV e TCPII apresentaram resistividades elétricas equivalentes entre si e 37% inferiores ao TCPV, de referência. Os traços TC10 e TCPV também foram considerados estatisticamente iguais e se diferiram em apenas 1 kΩ.cm. Nessa idade, os melhores resultados foram apresentados pelos traços TSA e TM, que apresentaram resistividade elétrica, em média, 81% superior à referência. O TSCA obteve RES 50% superior a do TCPV.

Aos 28 dias, os traços TCV30, TCV10, TCPII e TCPV apresentaram resistividades elétricas estatisticamente equivalentes (Tabela 53, Apêndice 08) e iguais, em média, a 10 kΩ.cm, enquadrando-se no limite entre alta e baixa probabilidade de corrosão. Os traços TCPIV, TM, TSCA e TSA apresentaram resultados 45%, 63%, 136% e 481% superiores à referência, respectivamente.

Aos 56 dias, apenas os traços TCV10 e TCPV foram considerados equivalentes entre si, conforme apresentado na Tabela 54 do Apêndice 08. Aos 91 dias, todos os traços apresentaram diferença significativa entre si (Tabela 55, Apêndice 08) e obtiveram resultados superiores ao de referência na seguinte proporção: TCV10, 28% superior; TM, 71%; TCPII, 78%; TCV30, 121%; TCPIV, 250%; TSCA, 335% e TSA, 571%.

Maiores discussões sobre o aumento da resistividade elétrica ao longo tempo estão expostas no item 4.7.1, que apresenta e debate sobre os fatores de idade dos traços ensaiados. Ressalta-se, entretanto, que a partir dos 28 dias os traços apresentaram a mesma tendência de crescimento. A resistividade elétrica aumentou na seguinte sequência: TCV10 < TCPV < TCPII < TCV30 < TM < TCPIV < TSCA < TSA.

O TSA, composto com sílica ativa, também apresentou os melhores resultados para resistência à compressão, absorção por imersão, índice de vazios e absorção por capilaridade. Provavelmente esse concreto resultou nos maiores

valores de resistividade elétrica porque com o uso da sílica ativa houve refinamento e melhor distribuição do tamanho dos poros na microestrutura da pasta, o que contribuiu para torná-la mais densa, uma vez que o TSA apresentou os melhores resultados em todos os ensaios realizados.

Além disso, através dos ensaios de caracterização das adições, foi possível observar que a sílica ativa apresentou a maior reatividade. No difratograma (Figura 23), essa adição se mostrou totalmente amorfa, sem a presença de picos referentes a fases cristalinas, diferente das demais adições que indicaram presença da formação de cristais. Ainda, a sílica ativa foi a adição que mais consumiu hidróxido de cálcio no ensaio Chapelle modificado.

Como as adições pozolânicas são aluminossilicatos reativos, que se solubilizam em meio alcalino e reagem em solução com os íons Ca^{2+} (SILVA, 2007), provavelmente com uso de sílica ativa - devido a esse alto consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - ocorreu uma redução da concentração dos íons nos poros, uma vez que o hidróxido de cálcio reagiu com a adição pozolânica formando géis C-S-H, contribuindo para a redução da condutividade e, conseqüente, para o aumento da resistividade elétrica.

Em concordância com os resultados apresentados, Abreu (1998) encontrou resistividades elétricas 225% superiores para concretos com substituição de 12% de sílica ativa em comparação a concretos compostos com CPV-ARI. Hoppe (2005) apresentou valores 88%, 269% e 442% superiores ao concreto de referência (com CPV-ARI) para 10%, 20% e 30% de substituição de cimento por sílica ativa, respectivamente. Santos (2006) também observou que, aos 91 dias, para um concreto com 10% de substituição de cimento por sílica ativa, a RES foi 778% superior ao traço de referência.

A sílica de casca de arroz apresentou o segundo maior resultado de resistividade elétrica. Esse resultado é coerente, uma vez que os ensaios de caracterização indicaram que essa adição é a segunda mais reativa utilizada nesse programa experimental. Missau (2004) também obteve aumento da resistividade elétrica ao substituir cimento por cinza de casca de arroz. Aos 91 dias, a RES do concreto com 10% de cinza de arroz foi 3 vezes maior do que a do traço com cimento CPV-ARI.

Embora a cinza volante seja uma adição de baixa reatividade, conforme indicaram os ensaios de caracterização, o alto teor desse material na composição do cimento CPIV (de 15 a 50%, apresentado na Tabela 18) provavelmente contribuiu para refinamento dos poros, reduzindo a condutividade do meio, e proporcionando maiores valores resistividade em relação ao concreto de referência, assim como nos experimentos realizados por Santor (2011) e Medeiros Jr. (2014). Apesar de o TCV30 também ter sido composto com alto teor de cinza volante, a origem da adição não é mesma e, portanto, podem ter reatividades diferentes e, conseqüentemente, resistividades distintas, conforme obtido na presente pesquisa.

A resistividade apresentada pelo TCV30 foi 1,2 vezes superior ao traço de referência. Em concordância com esse resultado, Hussain e Rasheeduzzafar (1994) obtiveram resistividade elétrica 2,2 vezes maior para o concreto com adição de cinza volante do que para a dosagem com 100% de cimento.

A adição de metacaulim também apresentou ganho significativo na resistividade elétrica se comparado ao traço de referência TCPV. Contudo, apresentou resultado similar ao TCPII, com RES 4% inferior. Ressalta-se que o cimento utilizado foi o CII-Z, composto com cinza volante. Provavelmente, o consumo de íons Ca^{2+} , devido a reação pozolânica, e o refinamento dos poros foi equivalente para os traços TM e TCPII, que também apresentou melhores resultados do que o traço de referência.

Conforme esperado, devido às reações pozolânicas, o TCV10 apresentou resistividade superior ao TCPV. Porém, como essa adição é de baixa reatividade, apresentou o menor ganho de RES em relação à referência, igual a 28%.

4.5.1.1. Correlações com outros ensaios

A seguir apresentam-se as correlações entre os resultados obtidos nos ensaios de resistividade elétrica e resistência à compressão, absorção por imersão, índice de vazios e absorção por capilaridade.

É possível observar na Figura 50 que, tanto para os resultados obtidos aos 28 quanto aos 56 dias, os índices de regressão linear obtidos ao se

correlacionar a resistência à compressão com a resistividade elétrica não foram altos. Nas duas situações a correlação foi inferior a 70%. Ou seja, a resistividade não cresceu, necessariamente, a medida que a resistência mecânica aumentou. Abreu (1998) também observou que o incremento da resistividade não foi acompanhado pelo aumento da resistência à compressão.

Destaca-se que a resistência à compressão também apresentou baixos índices quando correlacionada com absorção por imersão, índice de vazios e absorção por capilaridade, como já apresentado nos itens 4.3 e 4.4, reforçando o fato de que avaliação da durabilidade não pode ser feita apenas com base nos resultados de resistência mecânica. Entretanto, atualmente, a resistência à compressão é a única propriedade prescrita por norma para o controle de qualidade do concreto endurecido (NBR 12655, 2015).

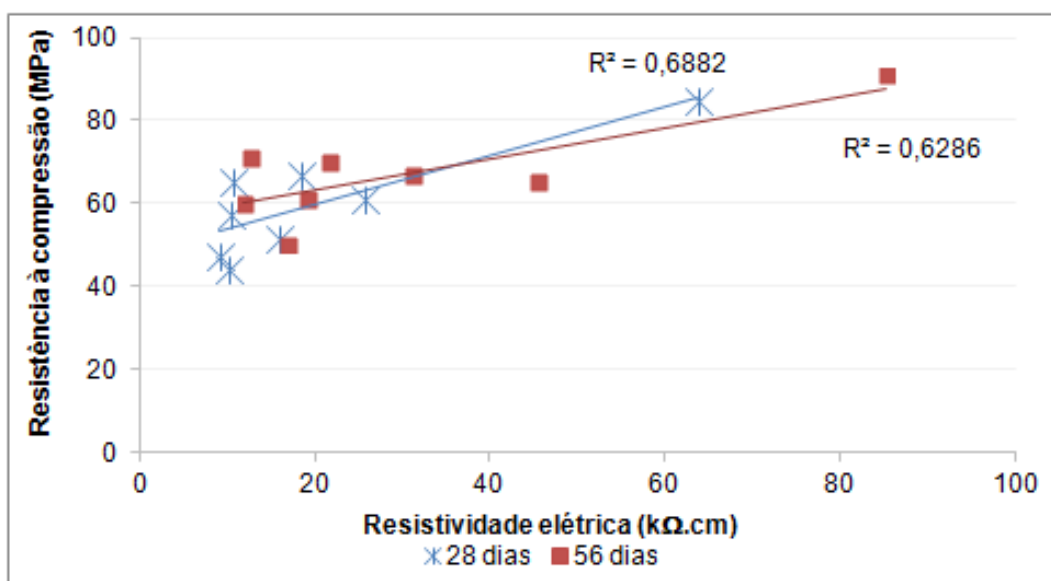


Figura 50 – Correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão

A resistividade elétrica relaciona-se com a permeabilidade de fluidos (ANDRADE & D'ANDREA, 2011) e é uma medida indireta da interconectividade entre os poros do concreto (ANDRADE, 2004). Apesar disso, a correlação entre o índice de vazios a RES foi baixa. O índice de regressão linear foi igual a 0,48, conforme pode ser observado na Figura 51. Isso sugere que a resistividade elétrica é mais influenciada pela composição da solução dos poros do concreto do que pela estrutura e conectividade dos poros em si. Além disso, embora a RES seja sensível ao teor de umidade do concreto, a correlação com os ensaios de

absorção por imersão e capilaridade também foram baixas, conforme pode ser observado na Figura 52 e na Figura 53.

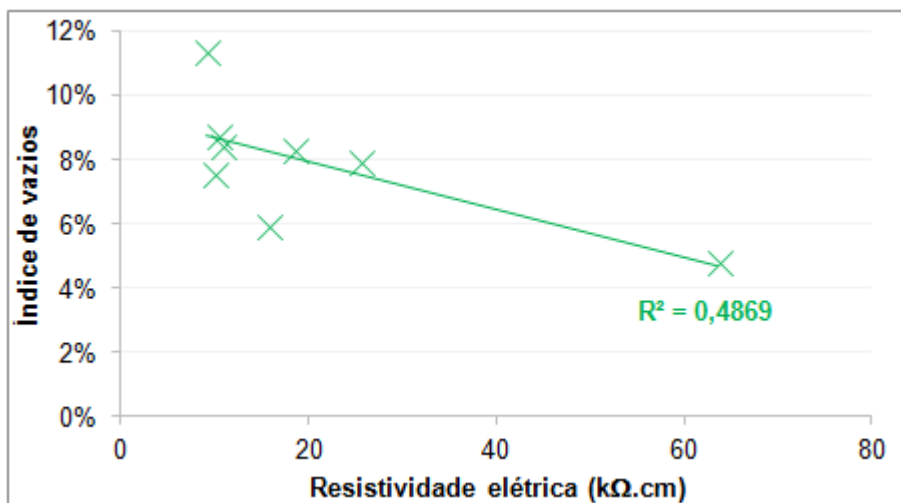


Figura 51 – Correlação entre resistividade elétrica e índice de vazios

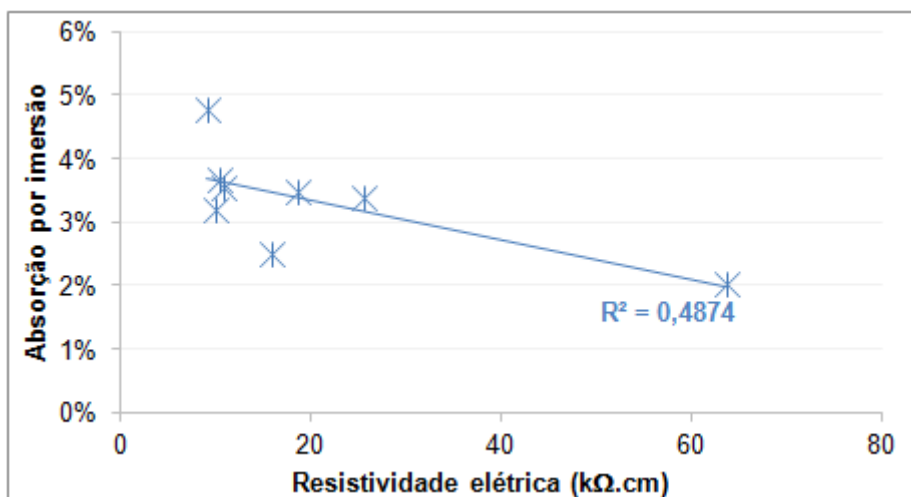


Figura 52 – Correlação entre resistividade elétrica e absorção por imersão

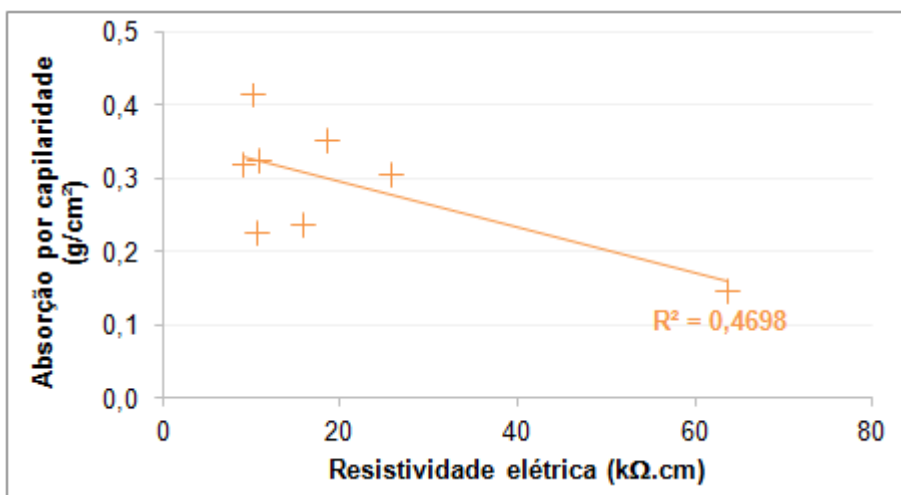


Figura 53 - Correlação entre resistividade elétrica e absorção por capilaridade

4.5.1. EFEITO DO TEOR DE ADITIVO

Conforme exposto no item 3, foi necessário utilizar teores de aditivos diferentes para os traços avaliados nesta pesquisa, a fim de manter a trabalhabilidade constante (avaliada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone) para todos os concretos e possibilitar adensamento equivalente em todas as situações. Assim, fez-se necessário avaliar o que essa diferença nos teores de aditivo superplastificante causaria na resistividade elétrica do concreto.

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial para diferentes teores de aditivos, as médias, os desvios padrão e os coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 56 do Apêndice 09. Os traços em que foi necessário eliminar valores espúrios para manter coeficientes de variação igual 10% estão apresentados na Tabela 57. Na Figura 54, encontram-se as médias dos resultados obtidos para resistividade elétrica superficial.

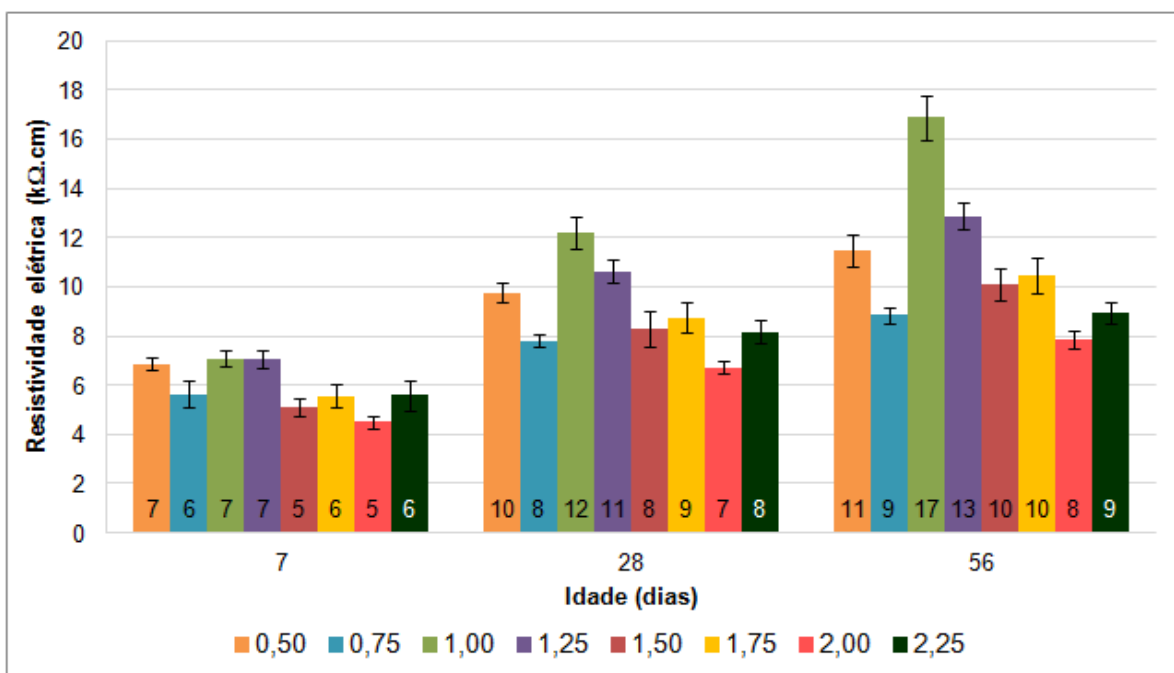


Figura 54 – Resultados médios de resistividade elétrica superficial para diferentes teores de aditivo

Apesar de a análise de variância ter mostrado influência significativa do teor de aditivos na resistividade elétrica (Tabela 32), os resultados não apresentaram uma tendência de comportamento. Aos 7 dias, os teores 0,50; 1 e 1,25% apresentaram resistividades elétricas similares, em torno de 7 kΩ.cm. Os

teores 0,75; 1,75 e 2,25% resultaram em RES iguais a 6 k Ω .cm. Já os demais teores (1,5 e 2%) apresentaram resistividade igual a 5 k Ω .cm. Porém, a partir dos 28 dias, houve valores que se distanciaram em até 41% (comparando o traço com 1% e 2% de aditivo em relação à massa de cimento). Aos 56 dias, essa diferença passou a 51%.

Tabela 32 - Análise de variância (ANOVA) para resistividade elétrica superficial para diferentes teores de aditivo

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Médias quadradas	F	F _{crítico}
Idade	2677	2	1338	3309	3,0
Teor de aditivos	11939	7	1706	4217	2,0
Erro	282	696	0		

Através das correlações entre os teores de aditivo e as resistividades medidas apresentadas na Figura 55 não é possível identificar a tendência ou o efeito dos aditivos nas resistividades elétricas avaliadas. Aos 7 dias, o índice de regressão linear foi igual a 0,40 e aos 28 dias este valor reduziu a apenas 0,23. Aos 56 dias, a correlação caiu mais 3 pontos, ficando igual a 0,20. Em concordância a esta pesquisa, Whiting & Nagi (2003) também não encontram efeito direto dos aditivos sobre a resistividade elétrica do concreto.

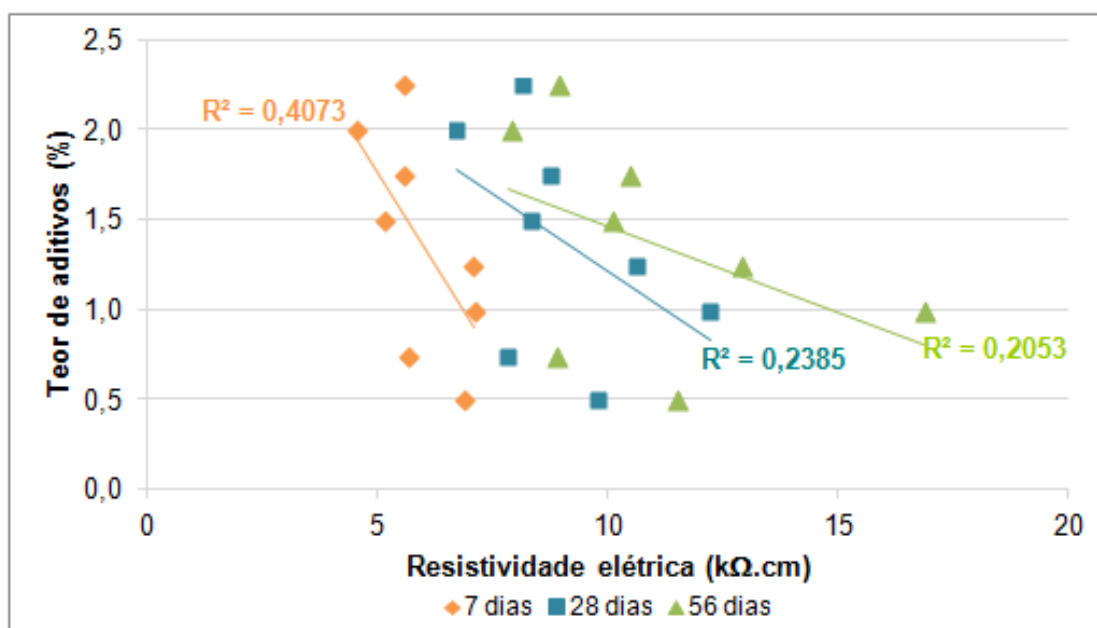


Figura 55 – Correlação entre teor de aditivos e resistividade elétrica superficial

4.5.2. EFEITO DO TEOR DE CLORETO

A avaliação do efeito do teor de cloretos foi realizada com o objetivo de verificar a necessidade da inserção de um fator que considere a redução da resistividade elétrica superficial devido à presença de cloretos livres na solução dos poros do concreto. Os resultados dos ensaios, as médias, os desvios padrão e os coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 58 do Apêndice 10. O traço em que foi necessário eliminar valores espúrios para manter o coeficiente de variação igual 10% está apresentado na Tabela 59.

Na Figura 56, encontram-se as médias dos resultados obtidos para os ensaios de resistividade elétrica superficial. É possível observar que a RES aumentou ao longo do tempo. Para o traço de referência, sem adição de cloretos, a resistividade dobrou dos 28 aos 91 dias. Para os traços com adição de 1, 2, 3 e 4% de cloretos, os valores aumentaram 70%, 66%, 71% e 50%, respectivamente. A análise de variância, apresentada na Tabela 33, indicou com 95% de confiabilidade que tanto a idade quanto o teor de cloretos foram fatores significativamente influentes na resistividade elétrica.

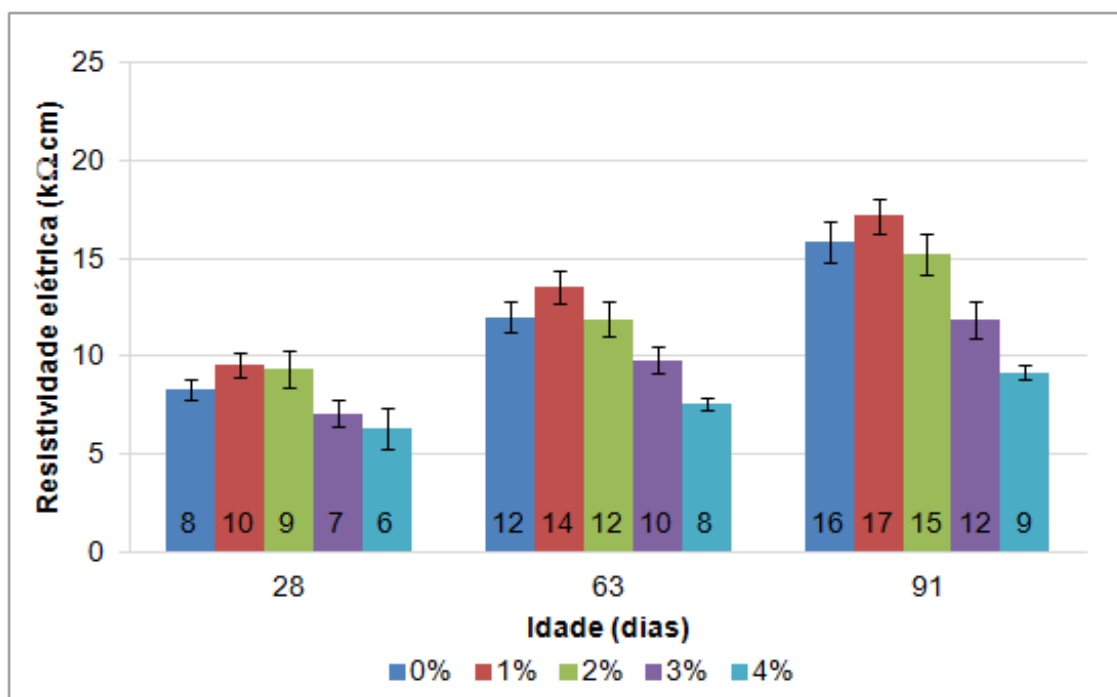


Figura 56 – Resultados médios de resistividade elétrica superficial para diferentes teores de cloreto

Tabela 33 - Análise de variância (ANOVA) para resistividade elétrica superficial para diferentes teores de cloreto

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Médias quadradas	F	F _{crítico}
Idade	1981	2	991	1529	3,0
Teor de cloretos	1518	4	380	586	2,4
Erro	224	345	1		

Aos 7 dias, o traço com adição de 1% de cloreto apresentou RES 25% superior ao traço de referência. Já para 2% de adição, a resistividade foi estaticamente equivalente ao traço sem cloretos, conforme indicado pelo Teste de Tukey apresentado na Tabela 60, Apêndice 11. Ao se adicionar 3 e 4% de cloretos, a RES prosseguiu reduzindo e resultou em valores 12,5% e 25% inferiores à referência, respectivamente. Aos 63 e 91 dias, as resistividades elétricas apresentaram a mesma tendência de comportamento, porém com diferenças maiores entre a referência e os traços com adição de cloretos. Para 4% de cloretos, por exemplo, a resistividade elétrica foi 43% inferior ao traço sem cloretos. Esse valor está de acordo com o exposto por Gjørsv *et al. apud* Tuutti (1982), que afirmaram que a resistividade elétrica do concreto reduz em 50% quando o teor de CaCl₂ passa de 0 a 4% em relação à massa de cimento (CASCUDO, 1997).

O fato de a resistividade elétrica ter aumentado com a incorporação de 1% de cloretos ao se comparar com o traço de referência pode ter ocorrido devido à formação de sal de Friedel, que tende a se depositar nos grandes poros (>60µm), reduzindo-os e os tornando descontínuos e mais tortuosos, como também defendem Wee *et al.* (2000). Além disso, de acordo com Hoppe Filho *et al.* (2013), a formação de sal de Friedel consiste em um processo de fixação dos cloretos, ou seja, uma reação do Cl⁻ com os aluminatos da pasta, não os deixando livres para ficarem na forma de íons dispersos na água de poro do concreto.

Outro efeito dos cloretos no concreto é que haveria íons cloretos não combinados que ficariam adsorvidos às camadas dos sais formados, também não contribuindo para a elevação da condutividade elétrica do sistema compósito de cimento Portland (BIRNIN-YAURI & GLASSER, 1998; BROMMFIELD, 2007). Entretanto, a partir da adição de 2% de cloretos, o sistema se saturaria em relação à fixação de cloretos e adsorção nas superfícies, além de haver o

esgotamento dos aluminatos disponíveis para formação do sal de Friedel. Atingido esse ponto de saturação, os cloretos adicionados em excesso à mistura ficariam livres, em suspensão na água dos poros e, por serem íons e conduzirem eletricidade, contribuiriam para redução da resistividade elétrica do concreto.

Santos (2006) obteve resultados em concordância aos obtidos na presente pesquisa. Para um traço com sílica ativa e relação $a/c = 0,50$, o autor encontrou que quanto maior o teor de cloretos adicionado ao concreto (com teores variando de 0,4 a 1%), menor a resistividade elétrica medida, porém com resultados ainda superiores ao traço de referência sem adição de cloretos.

Em resumo, os resultados obtidos apontam que com a incorporação de 1% de cloretos em relação à massa de cimento a resistividade elétrica superficial aumentou. Entretanto, para os concretos com teores de cloreto acima de 1%, a RES reduziu conforme os cloretos incorporados aumentaram. É possível observar melhor este fato através do gráfico de correlação entre o teor de cloreto e a resistividade elétrica do concreto, apresentado na Figura 57. Com o aumento da idade, o índice de regressão linear (R^2) aumenta. Ao se correlacionar o teor de cloreto com a resistividade elétrica desconsiderando os resultados obtidos para o concreto livre de cloretos, foram obtidos valores de R^2 acima de 0,90 conforme pode ser observado na Figura 58. Ou seja, um alto índice de correlação que indica que quanto maior o teor de cloretos incorporados ao concreto, menor a resistividade elétrica.

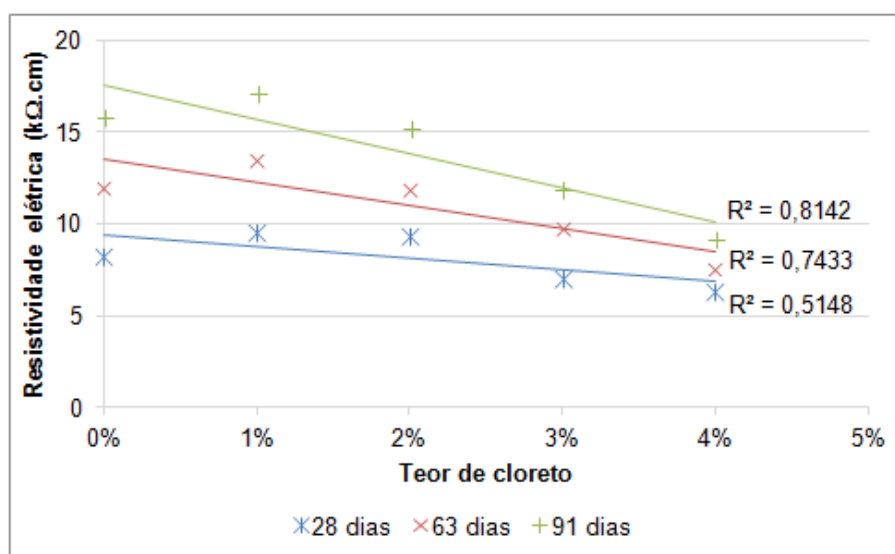


Figura 57 – Correlação entre teor de cloreto e resistividade elétrica considerando 0% de cloretos

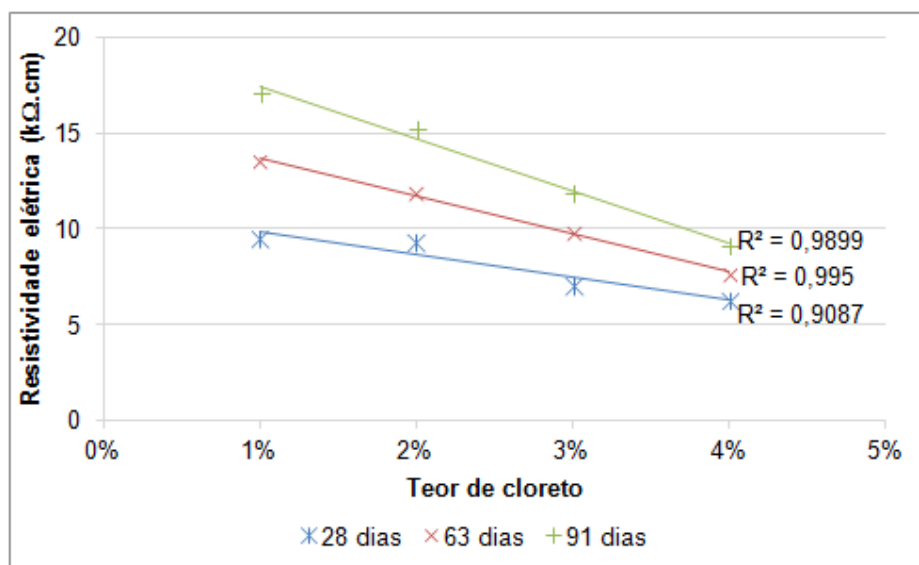


Figura 58 - Correlação entre teor de cloreto e resistividade elétrica não considerando 0% de cloretos

Os resultados indicam que é necessário um fator de minoração da resistividade elétrica superficial devido à contaminação por cloretos. Entretanto, ressalta-se que os ensaios dessa dissertação foram realizados com cloretos internos e pesquisas para avaliar o efeito de cloretos externos na RES ainda são necessárias, a fim de se identificar uma tendência de comportamento. Além disso, é preciso avaliar o comportamento da resistividade na presença de cloretos para concretos compostos com outros tipos de cimento e com a presença de adições pozolânicas, uma vez que a combinação de cloretos é influenciada pelo tipo e pela quantidade de aglomerante, conforme será discutido no item 4.7.3.

4.6. COEFICIENTE DE DIFUSÃO NO ESTADO NÃO ESTACIONÁRIO

Os resultados médios da corrente passante no ensaio de migração, bem como os desvios padrão e coeficiente de difusão estão apresentados na Tabela 61, do Apêndice 12. Na Figura 59 apresenta-se o gráfico com as correntes passantes para cada traço avaliado. Na sequência, apresentam-se na Figura 60 as cargas médias acumuladas nos ensaios de migração de cloretos. Resultados mais detalhados encontram-se no Apêndice 12, Tabela 62.

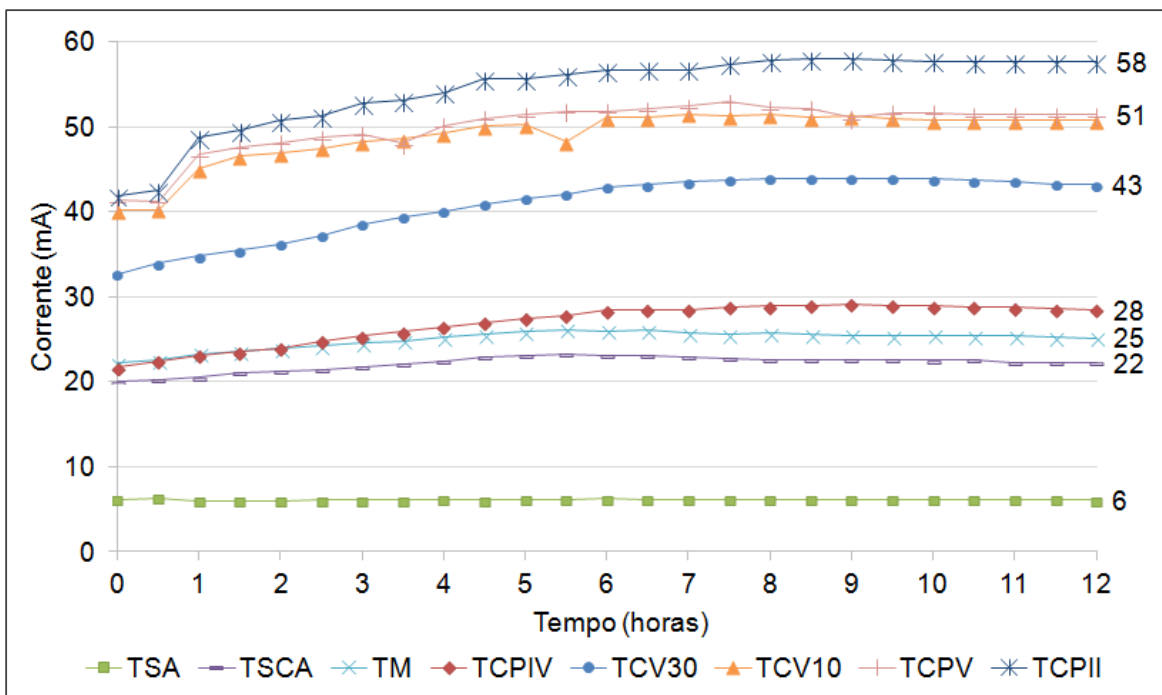


Figura 59 – Corrente passante média no ensaio de migração

Comparando os resultados obtidos para as cargas acumuladas com os limites de penetrabilidade de íons cloreto prescritos pela ASTM C1202 (2005), conforme exposto na Figura 60, é possível observar que nenhum traço se enquadrou na faixa de alta penetrabilidade. Embora os traços TCPII, TCPV e TCV10 tenham apresentado moderada penetrabilidade, os valores das cargas acumuladas ficaram próximos ao limite inferior descrito pela norma, igual a 2000 Coulombs. Os concretos TCV30, TCPIV, e TM puderam ser classificados com baixa penetrabilidade de cloretos, enquanto os traços TSCA e TSA se apresentaram com muito baixa penetrabilidade. Ressalta-se que cada um dos traços ficou em extremos opostos das faixas prescritas pela ASTM C1202.

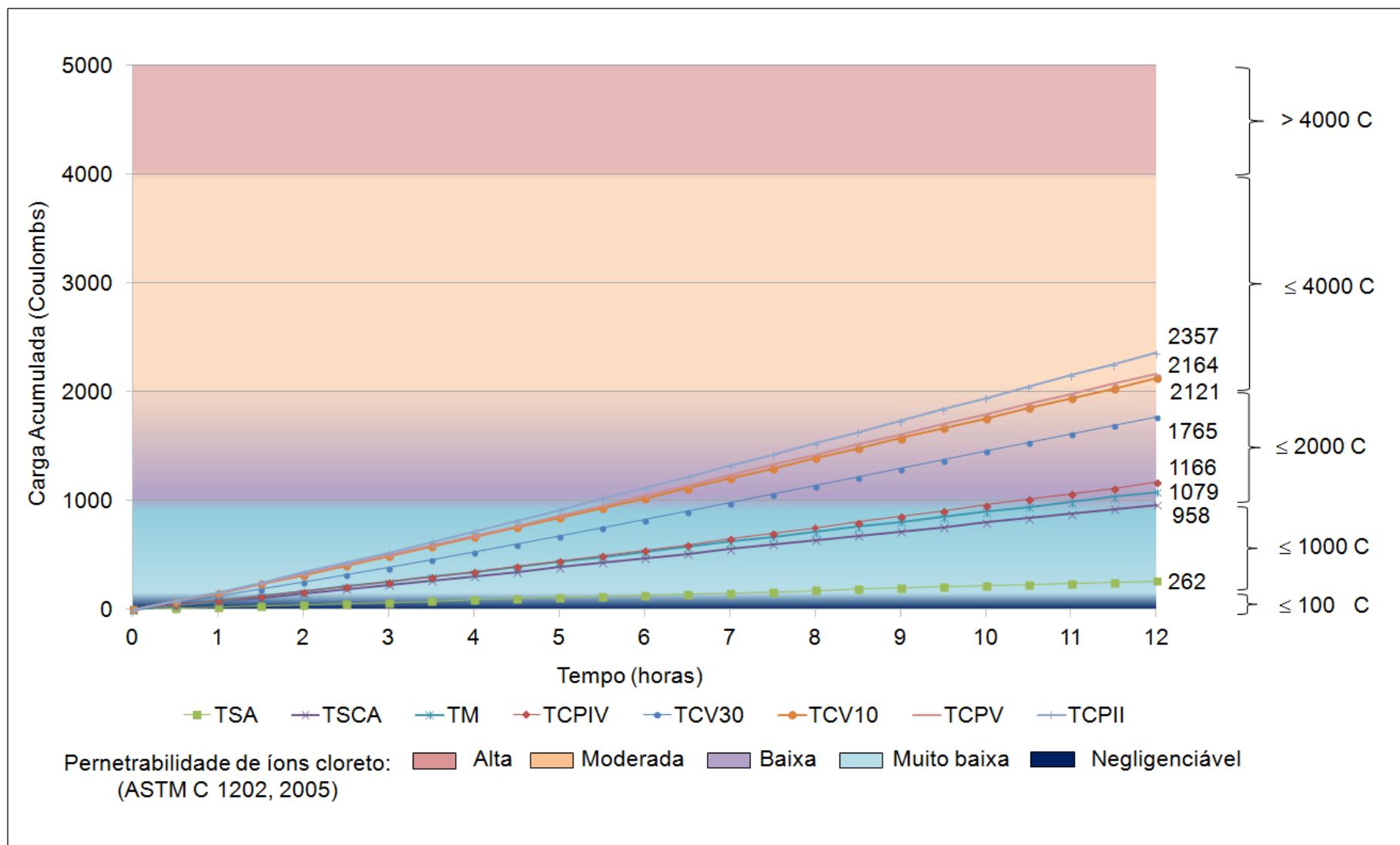


Figura 60 – Carga média acumulada no ensaio de migração

Santos (2006) apresentou coeficientes de difusão iguais a $1,2 \times 10^{-8}$ cm²/s e $2,2 \times 10^{-8}$ cm²/s, para relações água/cimento iguais a 0,40 e 0,50, respectivamente, ao substituir cimento por 10% de sílica ativa. Andrade *et al.* (2013) encontraram valores parecidos ao adicionar sílica ativa e cinza volante ao concreto. Aos 38 dias, os coeficientes de difusão foram próximos a $1,2 \times 10^{-7}$ cm²/s para concreto com adição de cinza volante. Para os concretos com incorporação das duas adições, os coeficientes de difusão caíram para valores em torno de $2,0 \times 10^{-8}$ cm²/s. Os coeficientes de difusão no estado não estacionário avaliados aos 91 dias para diferentes tipos de cimento apresentados por Medeiros Jr. (2014) variaram entre 5×10^{-9} cm²/s e 2×10^{-8} cm²/s. É possível que os coeficientes de difusão apresentados na Figura 61 tenham sido maiores do que os obtidos por outros autores devido às diferenças nas composições dos traços. Destaca-se, também, que os ensaios foram realizados aos 28 dias.

Analisando a variância dos resultados obtidos (Tabela 34) é possível concluir que a variação da composição dos concretos influenciou de maneira significativa os coeficientes de difusão. Entretanto, de acordo com os resultados obtidos no Teste de Tukey, apresentados na Tabela 66 do Apêndice 13, os coeficientes de difusão dos traços TCPII e TCV30 são estatisticamente equivalentes, bem como o TCV10 é análogo ao TCPV e os traços TCPIV, TSCA e TM apresentaram resultados estatisticamente iguais.

Tabela 34 - Análise de variância (ANOVA) coeficientes de difusão no estado estacionário

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Médias quadradas	F	F _{crítico}
Entre grupos (traços)	2E-12	7,0	3E-13	215,5	2,4
Dentro dos grupos (residual)	3E-14	23,0	1E-15		

Apesar de as profundidades de penetração de cloretos terem sido distintas para cada traço ensaiado (Tabela 65, Apêndice 12), a correlação entre a carga acumulada no ensaio de migração de cloretos e o os coeficientes de difusão no estado não estacionário foi alta. Na Figura 62 é possível observar que o índice de regressão linear R² foi igual a 0,84. Ou seja, a medida que a carga acumulada cresceu, o coeficiente de difusão também aumentou.

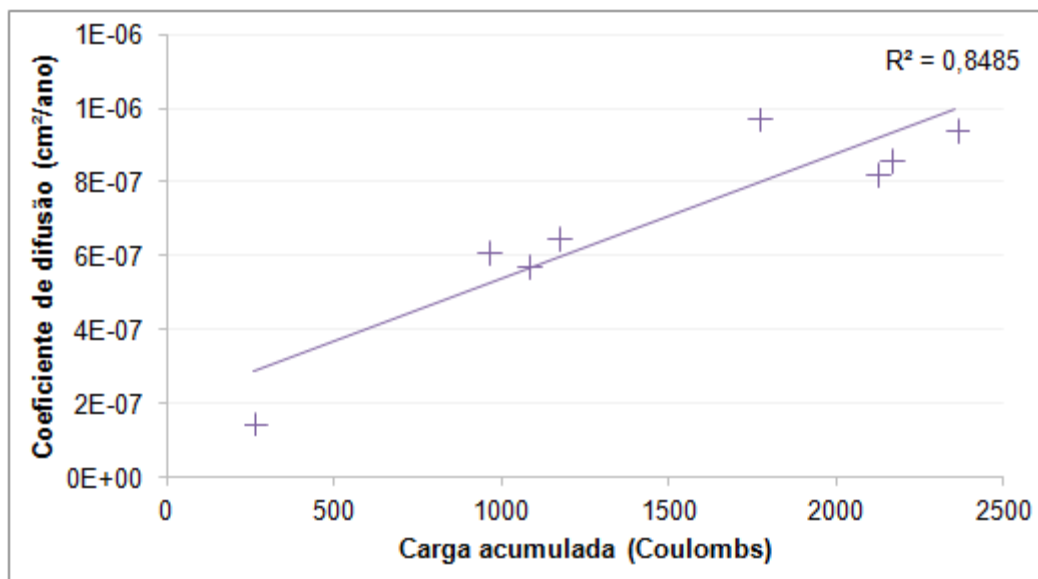


Figura 62 – Correlação entre carga acumulada e coeficiente de difusão

Ao se comparar as resistividades elétricas medidas aos 28 dias com os coeficientes de difusão obtidos a partir do ensaio de migração de cloretos, é possível notar boa correlação entre os parâmetros. O índice de regressão linear foi igual a 0,87, como pode ser observado na Figura 63, ressaltando o exposto por Andrade & D'Andrea (2011), de que a resistividade elétrica indica a capacidade de transporte cargas elétricas e se relaciona com a difusividade de íons através dos poros do concreto.

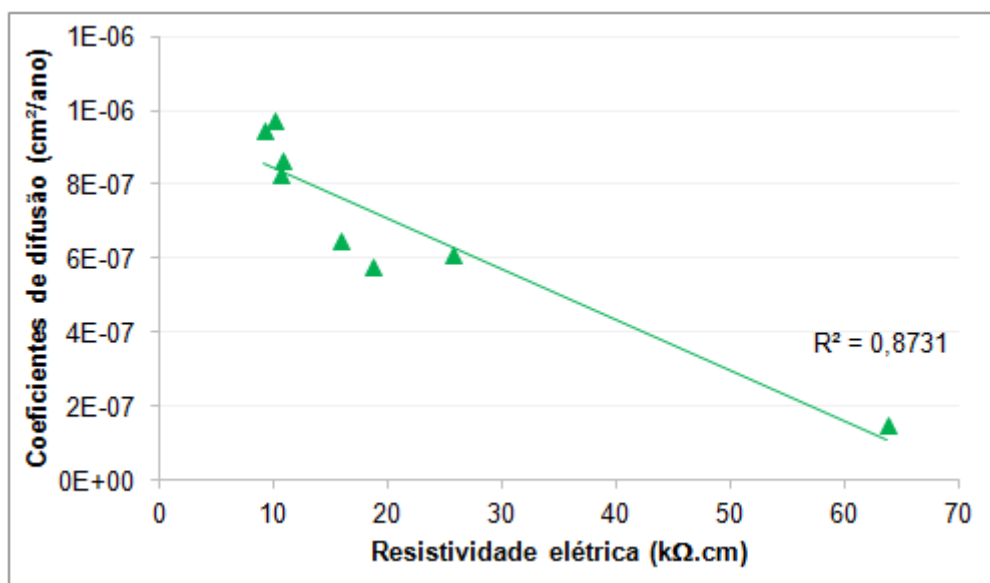


Figura 63- Correlação entre resistividade elétrica e coeficiente de difusão

Atentando-se ao fato de a resistividade elétrica indicar a capacidade de transporte cargas elétricas no concreto, fez-se a comparação entre essa propriedade e carga acumulada e corrente passante. É possível observar na Figura 64 e na Figura 65 que os índices de regressão linear, mesmo não tendo resultado em valores altos, indicaram que há sim correlação entre os ensaios de migração de cloretos e resistividade elétrica. Hoppe Filho *et al.* (2013) e Antiohos *et al.* (2013) já haviam sugerido essa ligação entre os ensaios, uma vez que calcularam resistividades elétricas baseados em resultados de ensaios de migração de cloretos.

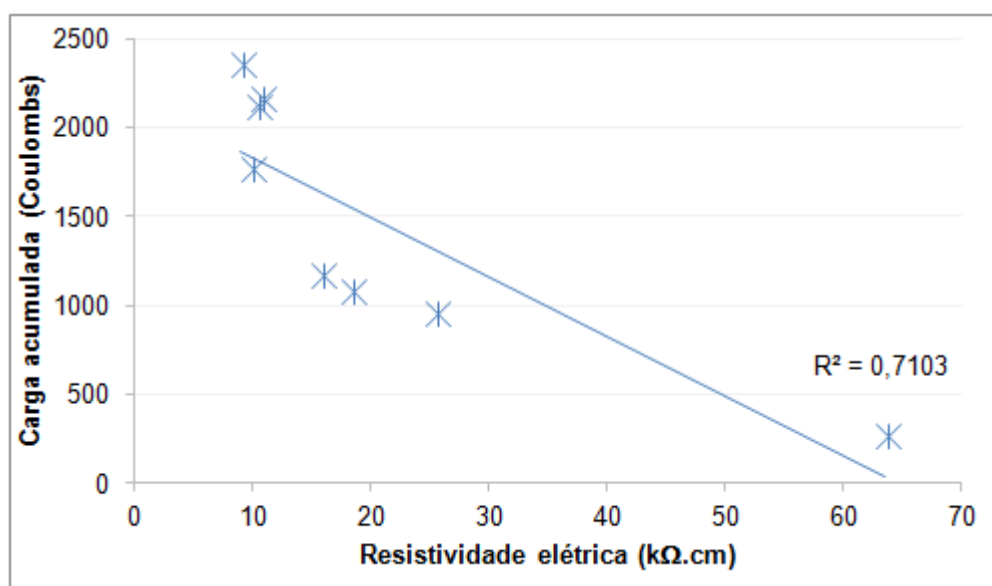


Figura 64 - Correlação entre resistividade elétrica e carga acumulada

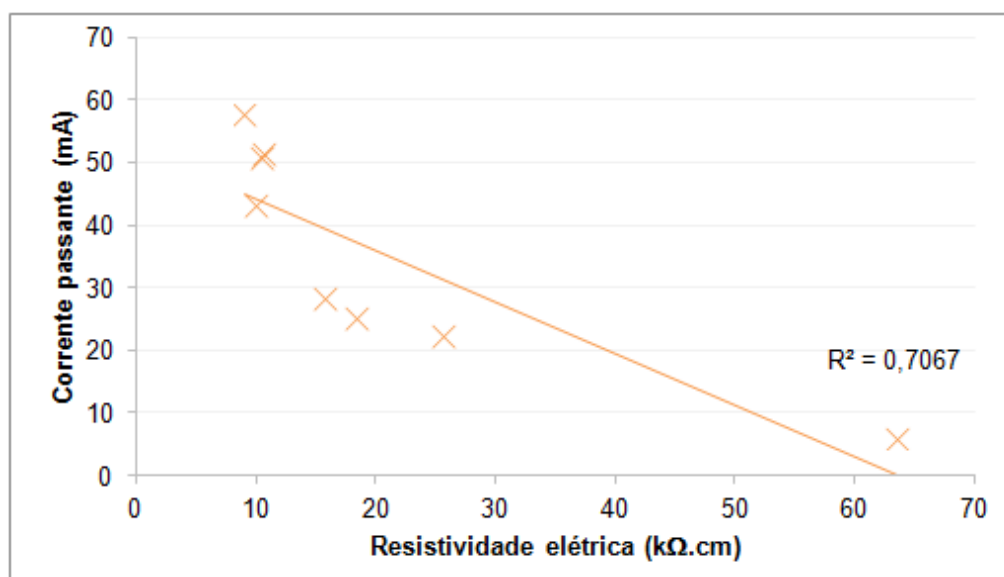


Figura 65 - Correlação entre resistividade elétrica e corrente passante

Baseado nisso, calculou-se a resistividade elétrica para os traços ensaiados, a partir da Equação 4, apresentada novamente a seguir.

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{L} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

ρ : resistividade elétrica calculada (k Ω .cm);

A: área da seção da fatia de concreto utilizada no ensaio de migração (cm²);

L: espessura da fatia de concreto utilizada no ensaio de migração (cm);

V: diferença de potencial aplicada no ensaio de migração (V);

I: corrente elétrica medida ao longo do ensaio (utilizou-se o valor após a estabilização da corrente elétrica, nas duas horas finais do experimento) (mA).

Os resultados obtidos através dos cálculos estão apresentados na Figura 66 ao lado das resistividades elétricas medidas aos 28 dias nos ensaios realizados através do método de Wenner. É possível observar que os valores foram próximos entre si para todos os traços. Além disso, a análise de variância, com 97% de confiabilidade, permitiu concluir que não houve variação nos resultados de resistividade elétrica ao de alterar o método de avaliação (Tabela 35), mas sim devido, apenas, à variação da composição dos traços.

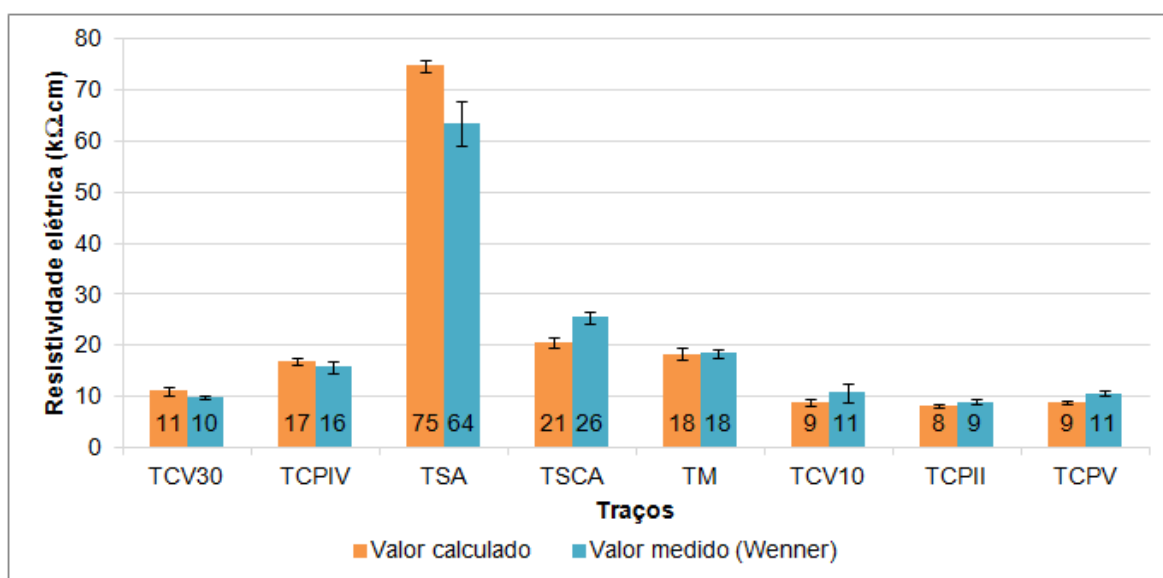


Figura 66 – Resistividades elétricas medidas e calculadas

Tabela 35 - Análise de variância (ANOVA) para resistividades elétricas medidas e calculadas

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Médias quadradas	F	F _{crítico}
Método de avaliação	14	1	14	4,56	4,56
Traço	96443	7	13778	4397	2,0
Total	97807	271			

Além disso, o índice de regressão linear obtido ao se comparar a resistividade elétrica calculada com a medida pelo método de Wenner foi igual a 0,98 (Figura 67), indicando que é possível avaliar a RES com base no ensaio de migração de cloretos, uma vez que os resultados foram equivalentes entre si.

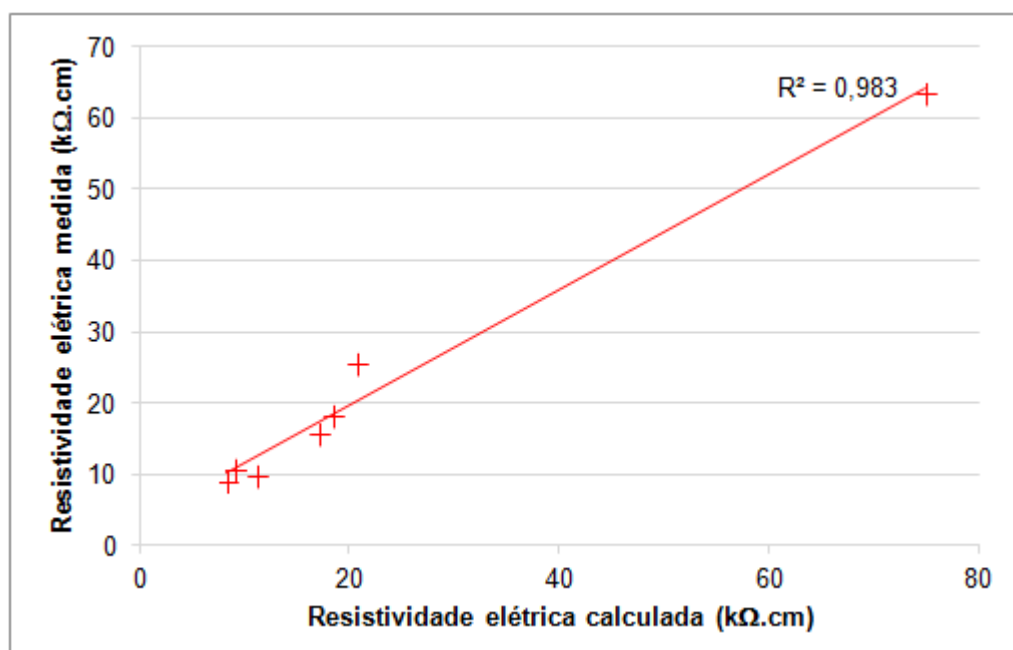


Figura 67 – Correlação entre resistividade elétrica calculada e medida

4.7. TEMPO DE INICIAÇÃO BASEADO EM ANDRADE (2004)

A seguir serão apresentados e discutidos os valores obtidos para os fatores de idade, os valores adotados para o fator ambiental, o fator de reação de cloretos e o período de iniciação baseado em Andrade (2004).

4.7.1. Fator de idade (q)

Conforme apresentado no item 2.3.1, o fator de idade é definido graficamente, onde a inclinação da curva obtida ao se representar o logaritmo do inverso da resistividade em função do tempo é o valor de $-q$ (ANDRADE *et al.*, 2013b). As curvas exponenciais obtidas através da plotagem do tempo x inverso da resistividade elétrica média de cada traço estão apresentadas Figura 68, bem como as respectivas equações, que apresentam os valores do fator de idade “q”. Esses valores podem ser melhor identificados através da Figura 69.

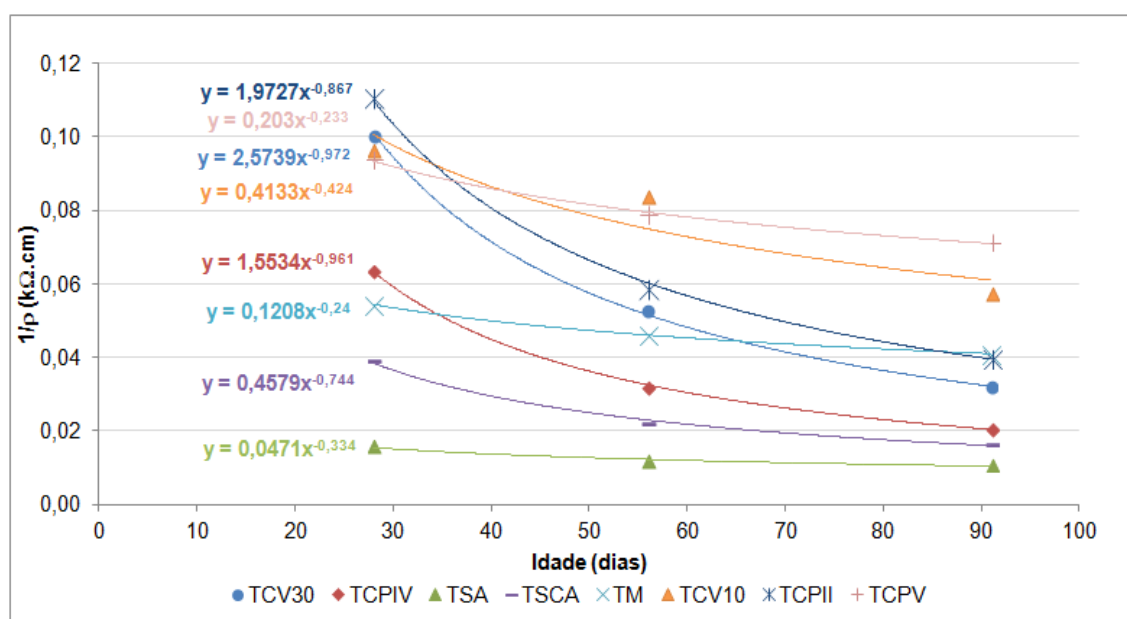


Figura 68 – Determinação do fator de idade “q”

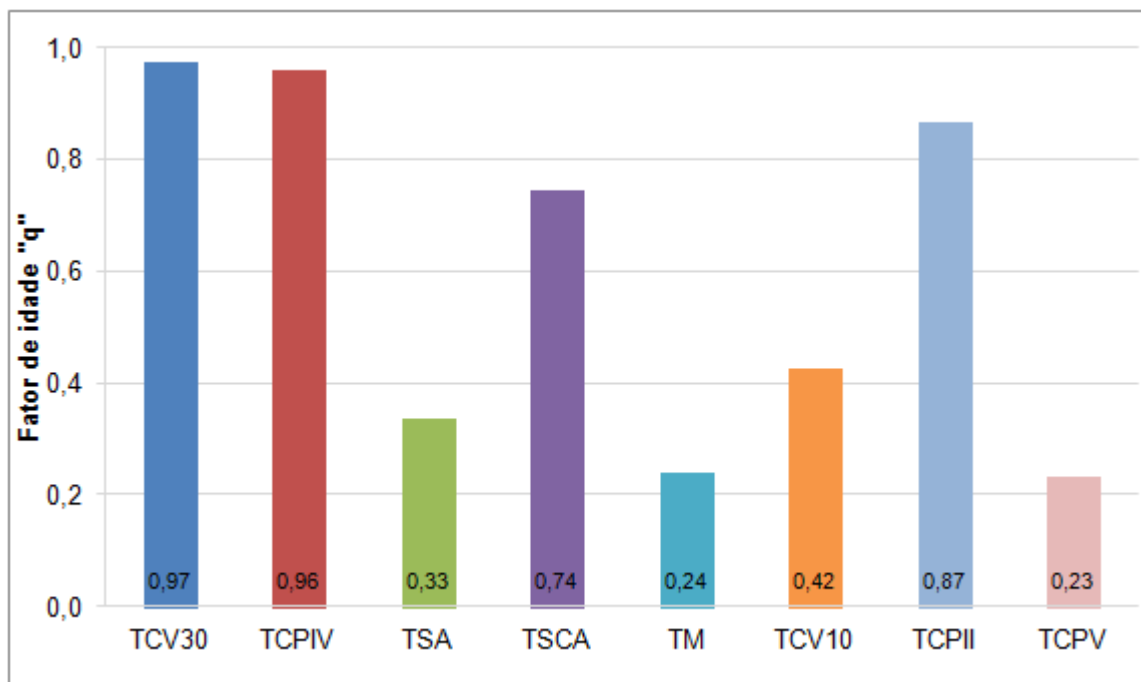


Figura 69 – Fatores de idade “q” por traço

O fator de idade representa o progresso da hidratação do cimento ao longo do tempo, o refinamento dos poros e o consequente aumento da resistividade elétrica (ANDRADE & D’ANDREA, 2010; MEDEIROS JR., 2014). Através dos resultados obtidos para os fatores de idade, apresentados na Figura 69, foi possível observar que a mudança na composição do concreto influenciou nos valores de q . Medeiros Jr. (2014) e Andrade *et al.* (2013) também encontraram variações para os fatores de idade ao alterar a composição do concreto, conforme apresentado no item 2.3.1.

O cimento CPV-ARI possui alta finura blaine e baixo teor de adição mineral, conforme exposto na Tabela 18. Por ter alta superfície específica, as reações de hidratação do CPV-ARI ocorrem mais rapidamente (MEHTA & MONTEIRO, 2014). Assim, o traço TCPV apresentou o menor fator da idade. Os traços compostos com CPV-ARI de Medeiros Jr. (2014) também apresentaram os menores valores de q . Segundo o autor, isso ocorreu por esse ser o cimento com maior teor de clínquer.

O traço TM resultou em um fator de idade equivalente ao traço de referência. Isso provavelmente ocorreu porque o metacaulim possui alto teor de alumínio (46%, apresentado na Tabela 21). Segundo Ambroise *et al.* (1994) *apud* Barata (1998), as reações entre o hidróxido de cálcio e as adições ricas em

alumínio processam-se de maneira muito rápida, formando aluminatos de cálcio hidratados. Assim, é coerente que o fator de idade para o traço TM tenha sido equivalente ao traço de referência.

Na sequência, o terceiro menor fator de idade foi obtido para o traço TSA. Pelo mesmo motivo que este traço apresentou os melhores resultados nos ensaios de resistência à compressão e de absorções por imersão e capilaridade, é provável que o concreto com sílica ativa tenha apresentado baixo fator de idade por ser composto com a adição e cimento mais reativos utilizados nesta pesquisa, conforme exposto nos itens 4.2 e 4.3. Assim, as reações ocorreram de maneira mais intensa nas primeiras idades e reduziram a velocidade ao longo do tempo. É possível observar que este traço apresentou resistividade alta já aos 28 dias, com uma média 481% superior à referência, conforme apresentado no item 4.5.2.

O traço TCV10, composto com 10% de cinza volante em substituição ao cimento CPV-ARI, apresentou fator de idade 82% superior ao traço de referência. Tal fato pode ser justificado pela cinza volante ser uma adição pozolânica de baixa reatividade. Além de o ganho de resistividade ser mais lento devido às reações pozolânicas, o consumo de hidróxido de cálcio é menor do que para as adições de maior reatividade (Tabela 20). Assim a reação entre a cinza volante e o Ca(OH)_2 se estabilizam em um tempo menor se comparadas com as adições pozolânicas de maior reatividade, uma vez que menos reações ocorreriam devido ao menor consumo de hidróxido de cálcio.

A sílica de casca de arroz, que consome menos hidróxido de cálcio do que a sílica ativa, porém mais do que a cinza volante, apresentou fator de idade igual a 0,74, 221% acima do traço de referência. Os resultados indicam que provavelmente a sílica de casca de arroz consumiu um alto teor de hidróxido de cálcio, já que apresentou altos valores de resistividade elétrica, porém de maneira lenta e progressiva.

O traço TCP11 apresentou valor de q 278% maior do que o traço de referência. Isso significa que as reações ocorreram de forma mais lenta e progressiva do que para o traço TCPV. O cimento CP11-Z possui menor finura blaine e maior teor de adições do que o CPV-ARI e, provavelmente por este motivo, apresentou maior fator de idade. Medeiros Jr. (2014) encontrou valores de q 40% maiores para o cimento CP11-F do que para o CPV-ARI. Ressalta-se que

nesta dissertação o cimento CII possuía adição pozolânica em sua composição, enquanto Medeiros Jr. (2014) utilizou um cimento com adição de fíler. É provável que a diferença apresentada ao comparar com os traços compostos com cimento CPV-ARI tenha se dado por isso, já que as adições pozolânicas são reativas e o fíler não é.

Os traços TCPIV e TCV30 resultaram nos maiores fatores de idade, ambos apresentaram valores 321% superiores à referência. As duas misturas possuem alto teor de cinza volante em sua composição, que é uma adição pozolânica de baixa reatividade (Tabela 20). Medeiros Jr. (2014) também encontrou os maiores valores de q para os traços compostos com maiores teores de adição pozolânica. Segundo o autor, isso ocorre porque as reações pozolânicas ocorrem com velocidade mais lenta, porém de maneira progressiva se comparadas as reações de hidratação do clínquer puro.

Na Tabela 44 estão apresentados os valores de q para os traços em que foi possível comparar com resultados obtidos por outros autores. Medeiros Jr. (2014) encontrou fatores distintos ao alterar a relação água/cimento dos concretos. Na presente pesquisa foi utilizada relação água/aglomerante e consumo de cimento diferentes da utilizada por Medeiros Jr. (2014) e os valores obtidos para os traços compostos com CPV-ARI e CPIV também foram diferentes. Ressalta-se também que os cimentos utilizados por Medeiros Jr. (2014) são da região sudeste do Brasil, enquanto os desta pesquisa são da região sul. Assim, a variação entre os valores do fator de idade pode ter ocorrido pelas diferenças nas características do próprio cimento, como por exemplo a qualidade da cinza volante utilizada na fabricação do CPIV.

Em relação ao cimento CII-Z, observou-se uma grande disparidade entre o valor obtido nesta pesquisa e o proposto por Andrade & D'Andrea (2010) e Andrade (2014), que realizaram ensaios com cimentos espanhóis. O valor do fator de idade para o cimento brasileiro foi 135% superior ao do material estrangeiro. Outros fatores podem ter influenciado nesta diferença, como por exemplo a relação água/aglomerante e o consumo de cimento, porém não é possível realizar esta análise, uma vez que Andrade & D'Andrea (2010) e Andrade (2014) propuseram valores de q sem especificar tais parâmetros.

Os traços TCV10 e TCV30 foram ensaiados a fim de se aproximarem das composições dos cimentos CII-Z e CIV, porém com a certeza do teor da adição presente no cimento. O valor de q obtido para a mistura TCV30 foi equivalente ao obtido para o traço TCIV. Porém, o traço TCII apresentou fator de idade 48% superior ao TCV10. Isso significa que o segundo concreto apresentou reações mais rápidas do que o primeiro. Provavelmente isso ocorreu porque o TCV10 foi composto com cinza volante e cimento CPV-ARI, que é mais fino e, portanto mais reativo, do que o CII-Z.

Tabela 36 – Comparação entre fatores de idade q

Cimento	Relação água/aglomerante	C _{cimento} (kg/m ³)	q	Fonte
CPV-ARI	0,45	360	0,23	Presente pesquisa
	0,4	498	0,3	Medeiros Jr. (2014)
	0,5	474	0,38	
CPV-ARI + 10% de substituição por cinza volante	0,45	360	0,42	Presente pesquisa
CII-Z	0,45	360	0,87	Andrade & D'Andrea (2010) & Andrade (2014)
	-	-	0,37	
CIV	0,45	360	0,96	Presente pesquisa
	0,4	498	0,74	Medeiros Jr. (2014)
	0,5	474	0,78	
CPV-ARI + 30% de substituição por cinza volante	0,45	360	0,97	Presente pesquisa

Analisando os valores de q , foi possível identificar que os traços TCPV, TM e TSA apresentaram reações mais rápidas do que os demais concretos, uma vez que essas misturas resultaram nos menores valores para os fatores de idade. Ou seja, as resistividades elétricas desses traços não cresceram de maneira progressiva ao longo da idade. Os traços TCV10, TSCA e TCII apresentaram fatores de idade 82%, 221% e 278% maiores do que o traço TCPV. As misturas TCIV e TCV30 apresentaram valores 321% superiores à referência. Isso significa que esses traços prosseguiram hidratando, enquanto o traço de referência não apresentou elevações significativas. Além disso, foi possível observar que a relação água/aglomerante, o consumo e a origem do cimento são parâmetros influentes no fator de idade.

4.7.2. Fator ambiental (k_{Cl})

Conforme apresentado na Tabela 9, item 2.3.2, os fatores ambientais relacionados com a agressão por íons cloretos são os referentes às classes de agressividade XS1, XS2 e XS3 apresentados pela norma EN 206-1 (2007), equivalentes às classes III e IV apresentadas pela NBR 6118 (2014). Pode-se visualizar na Tabela 37 os fatores ambientais e cobrimentos mínimos prescritos pela NBR 6118 conforme as classes de agressividade, correlacionando com a norma EN 206-1 (2007). Esses foram os valores adotados para os cálculos do fator de reação de cloretos, no item 4.7.3 e do período de iniciação da corrosão, no item 4.7.5.

Tabela 37 – Classes de agressividade ambiental, fatores ambientais e cobrimentos

Classe de agressividade (EN 206-1, 2007)	Risco de corrosão	kCl (cm ³ .Ω/ano)	Classe de agressividade (NBR 6118, 2014)	Descrição	Cobrimentos (mm)			
					Concreto armado		Concreto protendido	
					Laje	Vigas/pilares	Laje	Vigas/pilares
XS1a	Corrosão induzida por cloretos da água do mar	5000	III (forte)	Marinha ou Industrial	35	40	40	45
XS1b		10000						
XS2		17000	I (fraca)	Submersa	20	25	25	30
XS3		25000	IV (muito forte)	Industrial ou respingos de maré	45	50	50	55

4.7.3. Fator de reação de cloretos (r_{Cl})

O fator r_{Cl} representa o número de vezes que a resistividade elétrica é aparentemente aumentada devido à reação dos íons cloretos com os aluminatos presentes na pasta de cimento, conforme já apresentado no item 2.3.3. Os fatores de reação de cloretos foram determinados baseados em valores já existentes na literatura, propostos por Andrade & D'Andrea (2010) e Medeiros Jr. (2014), conforme apresentado na Tabela 38.

Tabela 38 – Fatores de reação de cloretos adotados

Traço	r_{Cl}	Fonte
TCPV	3,38	Medeiros Jr. (2014)
TCPII-Z	3,00	Andrade & D'Andrea (2010)
TCPIV	1,73	Medeiros Jr. (2014)
TSA	1,50	Andrade & D'Andrea (2010)
TSCA	1,50	Andrade & D'Andrea (2010)
TM	1,50	Andrade & D'Andrea (2010)
TCV10	3,00	Andrade & D'Andrea (2010)
TCV30	1,73	Medeiros Jr. (2014)

Conforme exposto no item 3, Programa Experimental, as porcentagens de substituição de cimento CPV – ARI por cinza volante iguais a 10 e 30% foram determinadas baseadas nos valores limites de adição de material pozolânico prescritos pela NBR 11578 – Cimento Portland Composto (1991) e NBR 5736 – Cimento Portland Pozolânico (1991), para se aproximar da composição dos cimentos CP II – Z e CP IV, utilizados no programa experimental. Assim, foi admitido que o fator de reação de cloretos dos traços TCPII-Z e TCPIV são iguais aos dos traços TCV10 e TCV30, respectivamente.

Para os traços compostos com pozolanas de alta reatividade (sílica ativa, metacaulim e sílica de casca de arroz), adotou-se o valor proposto por Andrade & D'Andrea (2010), igual a 1,50, para concretos compostos com 10% de sílica ativa.

Entretanto, considerando que os íons cloreto se combinam quimicamente com o C_3A e C_4AF formando cloroaluminatos (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997; PEREIRA & CINCOTTO, 2001; HOPPE FILHO *et al.*, 2013). Portanto, provavelmente quanto maior for a quantidade de aluminatos do concreto, maior será sua capacidade de fixação de cloretos e maior será o fator r_{Cl} .

Conforme apresentado na Tabela 20 – Características físicas e atividade pozolânica das adições empregadas, a adição mineral que apresentou maior porcentagem de óxido de alumínio (Al_2O_3) foi o metacaulim, com 46%. Na sequência, a cinza volante apresentou 26,3%. A sílica de casca de arroz e sílica ativa apresentaram 2,4 e 1,9%, respectivamente. Assim, seria provável que o traço TM apresentasse o maior valor de r_{Cl} , seguido dos traços compostos com 30

e 10% de cinza volante, do traço TSCA e por último o traço TSA, composto tanto pelo cimento que apresentou menor teor de C_3A , quanto pela adição pozolânica que apresentou menor porcentagem de Al_2O_3 .

Comparando os fatores de reação de cloreto apresentados por Santos (2006), Andrade & D'Andrea (2010), Andrade *et al.* (2013) e Medeiros Jr. (2014), como já apresentado na Tabela 14, item 2.3.3, é possível observar que os valores também foram discrepantes entre si. Mesmo para consumos de cimento próximos, para CII-Z, Medeiros Jr. (2014) obteve valores de r_{Cl} 3 vezes maiores do que Santos (2006). Além disso, Andrade *et al.* (2013) propuseram um fator de reação de cloretos de 3 a 5 vezes superior ao obtido por Medeiros Jr. (2014) para o cimento CIII-RS.

4.7.4. Cálculo do tempo de iniciação

Conforme já apresentado no item 2.3, Equação 5, o período de iniciação proposto por Andrade (2004) é calculado a partir da seguinte equação:

$$t_i = \frac{x^2 \cdot \rho_{ef} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^q \cdot r_{Cl}}{k_{Cl}} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

t_i : tempo de iniciação da corrosão (anos);

x : profundidade de penetração da concentração limite de cloretos (cobrimento do concreto);

ρ_{ef} : resistividade elétrica superficial da primeira medição realizada;

t : idade em que a resistividade elétrica foi mensurada pela última vez para definição do fator de idade e aplicação do modelo;

t_0 : idade em que a resistividade elétrica foi mensurada a primeira vez;

q : fator de idade;

r_{Cl} : fator de reação de cloretos;

k_{Cl} : fator que depende do teor de cloretos do ambiente.

Para o cálculo do t_i (período de iniciação da corrosão) foram aplicados os fatores ambientais 10000 e 25000, referentes as classes de agressividade III e IV da NBR 6118 (2014) e os respectivos fatores de reação de cloretos de cada traço, apresentados no item 4.7.3. A resistividade elétrica utilizada no cálculo foi a média dos resultados obtidos aos 28 dias. Assim, o t_0 considerado foi igual a 28 dias e o t igual a 91 dias, já que este foi o intervalo de tempo utilizado para determinado o fator de idade “q”. Os cobrimentos utilizados no cálculo estão expostos na Tabela 37, item 4.7.3. Para a Classe de Agressividade III, foi utilizado o cobrimento igual a 4 cm e para a Classe IV, igual a 5 cm. Os resultados para os períodos de iniciação de corrosão estão apresentados nas Figuras Figura 70 e Figura 71.

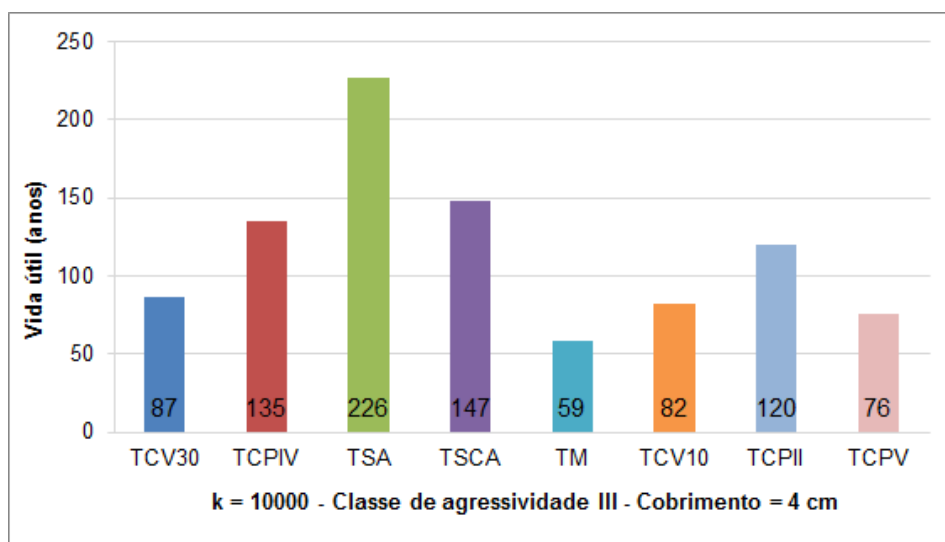


Figura 70 - Tempo de vida útil para Classe de Agressividade III

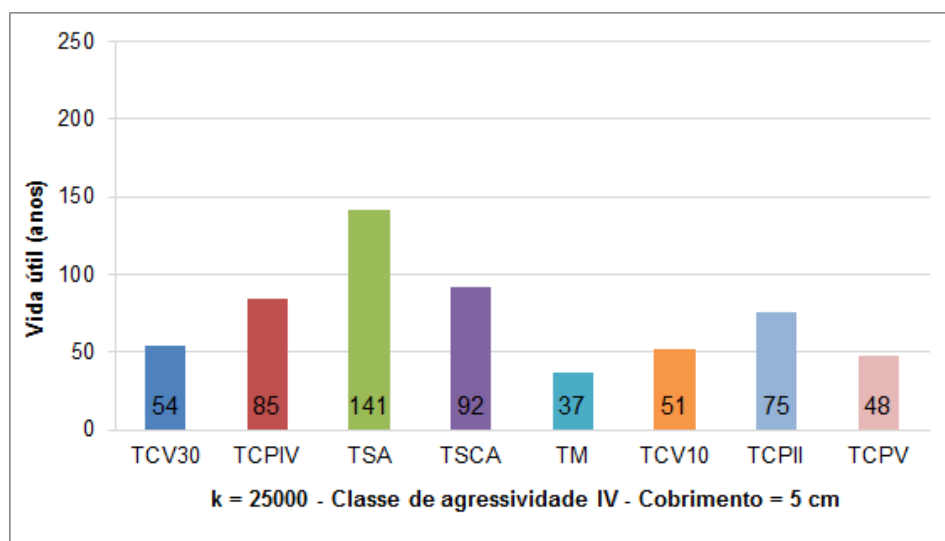


Figura 71 - Tempo de vida útil para Classe de Agressividade IV

Comparando os resultados obtidos nos cálculos do período de iniciação da corrosão é possível observar que, com exceção do traço TM (composto com metacaulim) todos os traços apresentaram valores superiores ao traço de referência, composto com o cimento CPV-ARI. O que traços possuem em comum é a presença de adição pozolânica (ressalta-se que o cimento CP II utilizado foi do tipo Z, composto com cinza volante). Em concordância aos resultados obtidos, Medeiros Jr. (2014) também identificou maiores resultados de vida útil para concretos compostos com adições pozolânicas.

O traço TSA, composto com sílica ativa, apresentou os melhores resultados ao longo de todos os ensaios e, conseqüentemente, a maior vida útil calculada, resultando em um valor 198% maior do que o traço de referência. Na seqüência, o segundo melhor resultado foi apresentado pelo traço TSCA, com um período de iniciação 94% maior do que o traço TCPV. O traço TCPIV resultou em um tempo de iniciação 78% superior ao traço de referência. O TCPII, também composto com cinza volante, apresentou resultado 58% superior ao traço de referência. Os traços TCPV30 e TCV10 mostraram-se 14% e 8% superiores ao traço TCPV, enquanto o traço TM apresentou período de iniciação 23% inferior à referência.

Vale ressaltar que nem todos os traços resultaram em resistência à compressão equivalentes aos 28 dias. Assim, a comparação entre os períodos de iniciação não foi realizada para concretos de mesma classe de resistência. Por isso, apresenta-se na Figura 72 a relação entre o período de iniciação em anos para $k_{Cl} = 25000$ e a resistência à compressão em MPa. Ou seja, apresenta-se o ganho de vida útil em anos por MPa para cada um dos traços ensaiados nesta pesquisa. É possível concluir, então, que houve um ganho de vida útil a medida que se utilizou os seguintes traços: TSA > TCPIV > TCPII > TSCA > TCV30 > TCV10 < TCPV < TM. Comparando de maneira unitária, o traço TSA apresentou resultado 130% melhor do que o traço de referência.

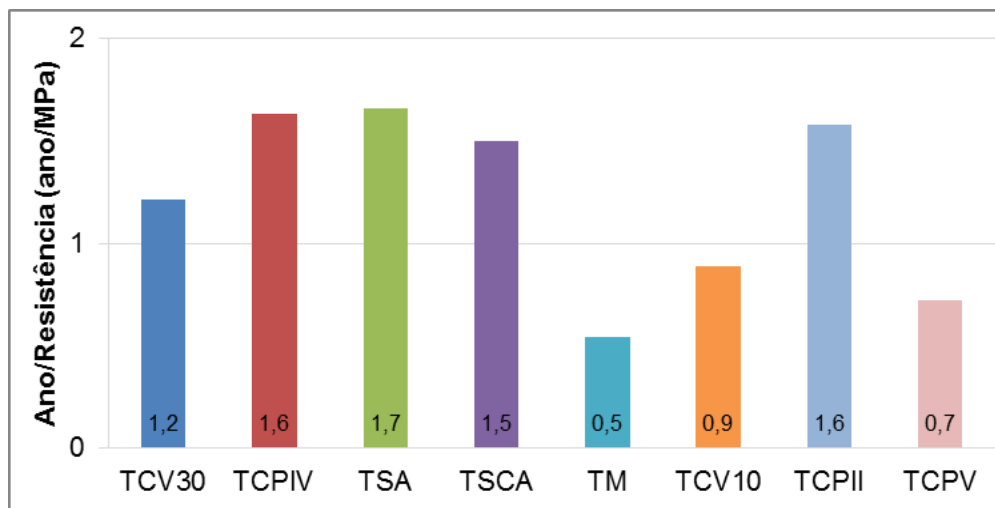


Figura 72 – Ano de vida ganho por MPa para $k_{Cl} = 2500$

4.8. ANÁLISE DE CUSTOS

Ao se analisar os custos absolutos para produção de 1m^3 de concreto considerando apenas o material, observa-se que as diferenças são pequenas (Figura 73). O TSA apresentou o maior custo, igual a R\$297, enquanto o TCPII, que apresentou o menor valor, custou R\$230. A diferença absoluta entre os traços foi de apenas R\$67 por m^3 .

Comparando os valores por MPa (Figura 74), uma vez que cada concreto apresentou uma resistência diferente, os valores absolutos também não foram significativamente diferentes entre si. Percentualmente, o TCV30, com maior custo, apresentou valor 50% superior ao traço de referência.

Entretanto, ao se avaliar o custo por ano de vida útil, os traços apresentam diferenças relevantes (Figura 75). O TSA apresentou valor que representa 38% do ao traço de referência TCPV. Observa-se que ao se utilizar adições pozolânicas, com exceção do metacaulim, há vantagens econômicas, uma vez que, devido à melhoria nas propriedades do concreto, as estruturas terão maior durabilidade e, conseqüentemente, menor custo com reparos e recuperações.

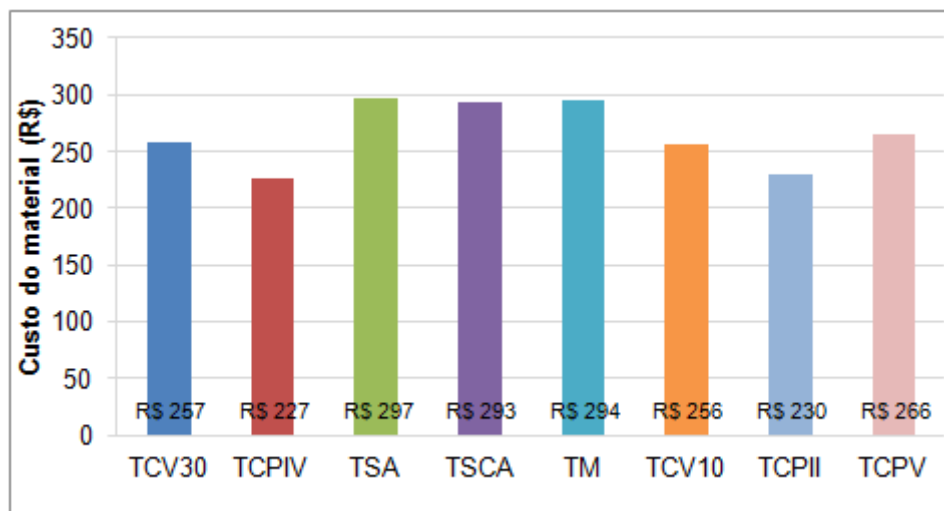


Figura 73 – Custo absoluto dos concretos

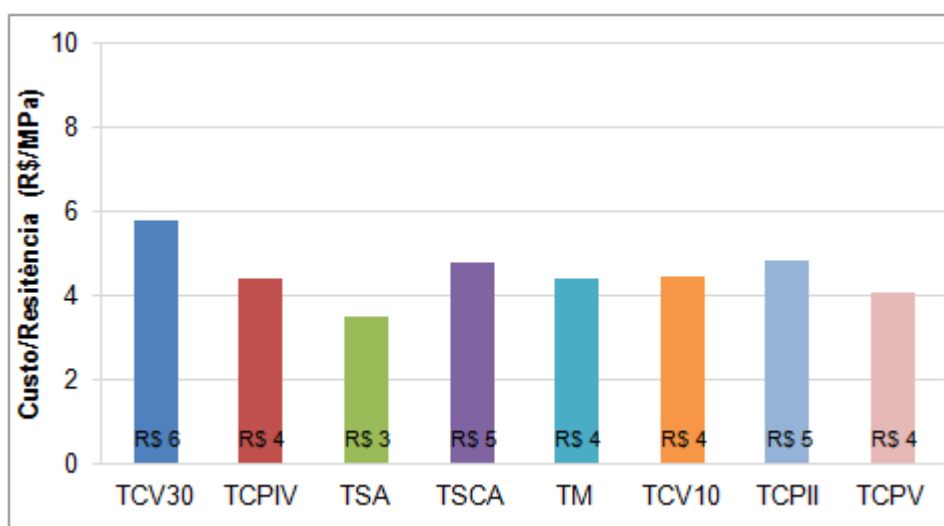


Figura 74 – Custo por MPa

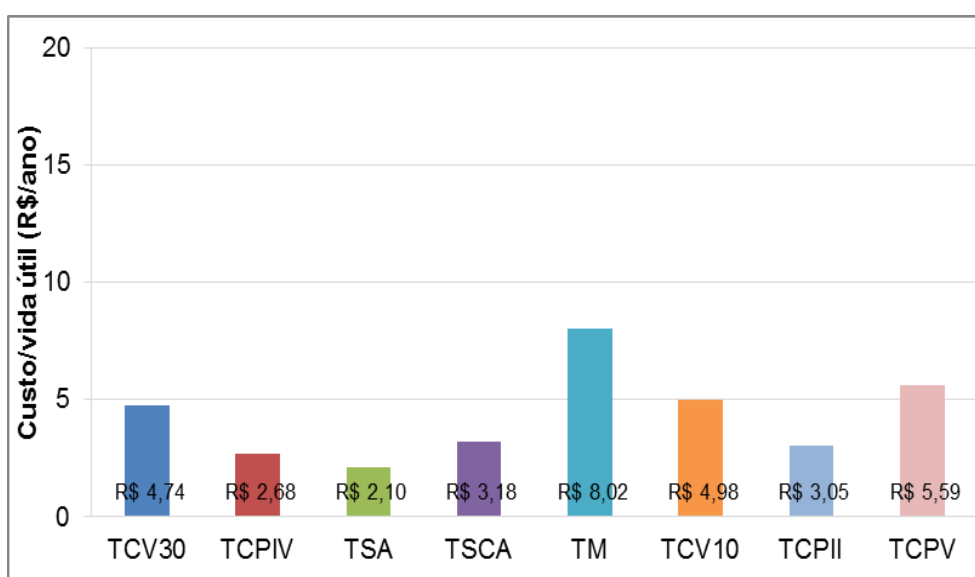


Figura 75 – Custo por ano de vida

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação teve como objetivo avaliar a influência do uso de adições pozolânicas na vida útil de concretos armados calculada segundo Andrade (2004) baseada na resistividade elétrica superficial do concreto. A partir dos resultados e discussões, apresentam-se neste item as conclusões dessa pesquisa, as recomendações para trabalhos futuros e atuação na área de publicações.

5.1. CONCLUSÕES

A resistividade elétrica foi influenciada pelo uso de adições pozolânicas e diferentes tipos de cimento e cresceu à medida que foram utilizados os seguintes materiais (adições em substituição ao cimento): 10% de cinza volante, CPV-ARI, CPII-Z, 30% de cinza volante, 10% de metacaulim, CPIV, 10% de sílica de casca de arroz e 10% sílica ativa. Esse resultado sugere que a RES aumenta à medida que o hidróxido de cálcio presente nos poros é consumido devido à reação pozolânica, reduzindo a concentração iônica e a condutividade do meio.

Também foram observadas baixas correlações entre resistividade elétrica e absorção por imersão, índice de vazios e absorção por capilaridade, reforçando que a RES seja mais influenciada pela composição da solução dos poros do concreto do que pela estrutura dos poros em si.

Não foi possível identificar uma tendência ou o efeito dos aditivos nas resistividades elétricas avaliadas. Entretanto, a RES reduziu à medida que o teor de cloretos incorporados ao concreto aumentou. Observou-se que há um ponto de saturação de combinação de cloretos ao cimento.

Foi possível calcular, para todos os traços, a resistividade elétrica a partir do ensaio de migração de cloretos.

O fator de idade foi influenciado pela composição do traço de concreto. Quanto maior o teor de alumínio do cimento e da adição, menor o fator de idade encontrado. Quanto mais reativa a adição pozolânica, mais rápida a reação e menor foi o fator de idade. Para cinza volante, adição de baixa reatividade, quanto maior o teor de, maior o fator de idade.

A presença de adições pozolânicas no concreto influenciou a resistividade elétrica, o fator de idade e o fator de reação cloretos. Consequentemente, influenciou na vida útil calculada com base em Andrade (2004). Com excessão do traço composto com metacaulim, todos os traços com a presença de adições pozolânicas (inclusive provenientes do próprio cimento) apresentaram vida útil superior ao traço de referência, composto com CPV-ARI. O traço composto com sílica ativa apresentou os melhores resultados para todos os ensaios realizados, bem como apresentou o menor custo por MPa e por ano de vida útil.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os seguintes temas são sugeridos para trabalhos futuros:

- Análise da influência da relação a/c e o consumo de cimento no fator de idade;
- Efeito da adição pozolânica no de reação de cloretos;
- Efeito do teor de adição pozolânica no fator de idade e no fator de reação de cloretos;
- Efeito da agressão por cloretos externos na resistividade elétrica do concreto;
- Influência do teor de cloretos na resistividade elétrica do concreto de concretos compostos com adição pozolânica e diferentes tipos de cimento;
- Verificar o fator ambiental através de ensaios acelerados a fim de parametrizar para regiões brasileiras.

5.3. ATUAÇÃO NA ÁREA DE PUBLICAÇÕES

Durante o período do mestrado, a aluna pesquisadora desse projeto atuou na publicação de artigos, seja proveniente do trabalho de pesquisas diretamente relacionadas ao tema da dissertação, seja por outras atividades desenvolvidas em disciplinas do curso. A seguir estão apresentados alguns resultados destas atividades:

5.3.1. Artigos publicados em eventos

No decorrer da atuação no mestrado foram publicados 5 artigos em congressos nacionais e internacionais, como segue:

Artigos publicados e apresentados pela mestranda em eventos:

- REAL, L. V.; OLIVEIRA, I.; MEDEIROS, M. H. F. Durabilidade do concreto armado: influência dos cloretos na resistividade elétrica. In: 56° Congresso Brasileiro do Concreto, Natal, 2014.
- REAL, L. V.; MEDEIROS, M. H. F. Influência do teor de cloretos na resistividade elétrica do concreto. In: X Congresso Internacional sobre Patologia y Recuperación de Estructuras: Cinpar, Santiago, Chile, 2014.
- REAL, L. V.; SOARES, T.; BOLA, D. R.; MEDEIROS, M. H. F. Avaliação da penetração de cloretos em concreto através do método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata. In: 1° Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, Foz do Iguaçu, 2014.
- REAL, L.; BRANDÃO, P. S.; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, A. M.; REAL, C. A. Concreto pré-fabricado: estudo comparativo entre cura a vapor e cura natural. In: 3° Encontro Nacional de Pesquisa, Projeto e Produção em Concreto Pré-moldado, São Carlos, 2013.
- MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V.; RICHTER, C.; SOUZA, W.; KLEIN, N. S. Ensaio de migração de cloretos em estado estacionário para avaliação de sistemas de proteção de superfície. In: Simpósio sobre materiais e construção civil, Toledo, 2013.

Artigo publicado em evento:

- SOARES, T.; REAL, L. V.; MEDEIROS, M. H. F. Discussão sobre o teor crítico de cloretos para despassivação da armadura do concreto. In: 1° Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, Foz do Iguaçu, 2014.

5.3.2. Artigos publicados em revistas

Em revista foram publicados os três artigos, listados a seguir:

- KLEIN, N. S.; AGUADO, A.; TORALLES-CARBONARI, B.; REAL, L. V. Prediction of the water absorption by aggregates over time: Modelling through the use of value function and experimental validation. *Construction & Building Materials*, v. 69, p. 213-220, 2014. [QUALIS A1 – Engenharias I – Capes]
- MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V.; RICHTER, C.; SOUZA, W.; KLEIN, N. S. Ensaio de migração de cloretos em estado estacionário para avaliação de sistemas de proteção de superfície. *REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 8, p. 54-63, 2014. [QUALIS B4 – Engenharias I – Capes]
- MEDEIROS JÚNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M.H.F.; REAL, L.V. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. *Revista ALCONPAT*, 2014. v. 4, n. 2, p. 116-132, 2014. [Qualis B3 – Engenharias I – Capes]

5.3.3. Artigos elaborados e em processo de avaliação

Alguns trabalhos elaborados estão em fase de revisão nos seus respectivos corpos editoriais. São eles:

Artigo em revista e em fase de avaliação:

- M. H. F. MEDEIROS; L. V. REAL; V. A. QUARCIONI; P. HELENE Concreto com superfície tratada e exposto a ambiente marinho: penetração por migração de cloretos. *Revista ALCONPAT*. [Qualis B3 – Engenharias I – Capes]
- REAL, L. V.; BOLA, D. R.; SOARES, T.; MEDEIROS, M. H. F. Avaliação da penetração de cloretos em concreto através do método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata. *Revista ALCONPAT*. [Qualis B3 – Engenharias I – Capes]

5.3.4. Artigo em eventos e em fase de publicação:

- MARQUES, J. L. S.; CAMPOS, H.F.; REAL, L.V. SOARES, T.C.; TOMASELI, D.; MIRANDA, L. Contribuição para avaliação da influência da granulometria de agregados reciclados em estruturas de contenção do tipo solo reforçado a partir do ensaio do arrancamento de pequeno porte. In: EURO ELECS, Guimarães, 2015 .
- REAL, L. V.; YAMASHITA, L. Y.; SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F. Influência da adição de nanotubos de carbono na resistividade elétrica superficial de argamassas de reparo. In: XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção, Lisboa, Portugal, 2015.
- SOUZA, D. J.; YAMASHITA, L. Y.; REAL, L. V.; MEDEIROS, M. H. F. Efeito da adição de nanotubos de carbono em argamassas de cimento Portland frente a retração e ao ataque por sulfato de sódio. In: XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção, Lisboa, Portugal, 2015.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. G. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. ASTM C-1202**. In: Annual book of ASTM Standards. West Conshohocken, 2005.

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

_____. Control de calidad del hormigon mediante la resitividad electrica. **Internacional Concrete Conference & Exhition Latin America**, Florianopolis, 2014.

_____. Model for prediction for reinforced concrete service life bases on electrical resistivity. **Revista IBRACON de Materiais**, v. 1, p. 01-05, December, 2005.

ANDRADE, C.; D'ANDREA, R. Electrical resistivity as microstructural parameter for the modeling of the service life of reinforced concrete structures. **2° International Symposium on Service Life Design for Infrastructure**, Delft, 2010.

_____. La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. **Revista ALCONPAT**, Vol. 1, pp. 93-101, 2011.

ANDRADE, C.; D'ANDREA, R.; CASTILLO, A.; CASTELLOTE, M. The use of electrical resistivity as NDT method for the specification of the durability of reinforced concrete. **NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering**, Nantes, France, 2009.

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

ANDRADE, C.; TAVARES, F.; CASTELLOTE, M.; PETRE-LAZARS, I. CLIMENT, M. A., VERA, G. Comparison of chloride models: importance of surface concentration. **2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering**, Quebec City, Canada, 2006.

ANDRADE, J. J. **Contribuição à previsão de vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos.** Tese (doutorado), Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ANGST, U.; VENNESLAND, O. Critical chloride content in reinforced concrete – State of the art. In: **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – Alexander et al (eds).** Taylor & Francis Group, London, 2009.

ANTIOHOS, S.K.; TAPALI, J.G; ZERVAKI, M.; SOUSA-COUTINHO, J.; TSIMAS, S.; PAPADAKIS, V. G. Low embodied energy cement containing untreated RHA: A strength development and durability study. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 455-463, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 11578:** Cimento Portland composto - Especificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 14832:** Cimento Portland e clínquer – Determinação de cloreto pelo método de íon seletivo – Especificação. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 15575-1:** ABNT NBR 15575-1:2013 Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 5737:** *Cimentos Portland resistentes a sulfatos.* Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 5751:** Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 7211:** Agregados – Agregados para concreto – Especificação. Janeiro, 2005.

BABOIAN, R. Corrosion – a problem of international importance. In: **ASTM STP 1000.** Corrosion testing and evaluation: Silver anniversary volume, Philadelphia, 1990.

BABOIAN, R. **Corrosion – a problem of international importance.** In: ASTM STP 1000. Corrosion testing and evaluation: Silver anniversary volume, Philadelphia, 1990.

BIRNIN-YAURI, U. A.; GLASSES, F. P. Fridel's Salt, $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl},\text{OH})\cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Its solid solutions and their role in chloride binding. **Cement and Concrete Research**, Vol. 28, N. 12, p. 1713–1723, 1998.

BROMMFIELD, J. P. **Corrosion of steel in concrete – Understanding, investigation and repair**. Londres: E& FN SPON, 1997.

CASCUDO, O. **Controle da Corrosão de Armaduras em concreto: inspeções e técnicas eletroquímicas**. 1ª Edição. Editora PINI. São Paulo. 1 v. 1997.

CASCUDO, O; CARASAK, H. Capítulo 24: Ação da carbonatação no concreto. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª Edição. Editora IBRACON. São Paulo. 1 v. 2011.

CASTELLOTE, M; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber: comparison with natural diffusion tests. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p.1411–1420, 2001.

CIMENTO ITAMBÉ LTDA. **Características dos cimentos**. www.cimentoitambe.com.br. Acesso em: 15 de julho de 2014.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Diagnosis and assessment of concrete structures: State-of-the-art report**. Bulletin 192, Lausanne, Switzerland, 1989.

DAL MOLIN, D. C. C. Capítulo 8: Adições minerais. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª Edição. Editora IBRACON. São Paulo. 1 v. 2011.

DOTTO, J. M. R. Ataque por íons de cloreto custa R\$ 800 milhões por ano ao Brasil. <http://www.cimentoitambe.com.br/ataques-por-ions-de-cloreto-custa-r-800-milhoes-por-ano-ao-brasil/>. Acesso em: 15 de julho de 2014.

DOTTO, J. M. R. **Corrosão do aço induzida por íons cloretos – uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com e sem pozolana**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2006.

FARIAS, R. F.; TEZUKA, Y. **Corrosão das armaduras de concreto: mecanismos e controle**. Boletim Técnico da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

FERREIRA, G. **Estudo sobre fatores influentes nos resultados de ensaios não destrutivos em concreto endurecido**. Dissertação (mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Uberlândia, 201.

FIGUEIREDO, E. P. Capítulo 25: Ação dos cloretos no concreto. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª Edição. Editora IBRACON. São Paulo. 1 v. 2011.

FIGUEIREDO, E. P.; MEIRA, G. R. Capítulo 26: Corrosão das armaduras das estruturas de concreto. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª Edição. Editora IBRACON. São Paulo. 1 v. 2011.

FRANÇA, C. B. **Avaliação de cloretos livres em concretos pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata**. Dissertação de Mestrado. Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2011.

GESOGLU, M. OZBAY, E. Effects of mineral admixtures on fresh and hardened properties of self-compacting concretes: binary, ternary and quaternary systems. **Materials and structures**, Vol. 40, pp. 923–937, 2007.

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

GOWERS, K. R.; MILLARD, S. G. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using wenner technique. **ACI materials journal**, v. 96-M66, p. 536–541, 1999.

HE, F. *et al.* AgNO₃-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete. **Construction and Building Materials**, Ed. Elsevier, 2011.

HE, F. *et al.* Calculation of chloride concentration at color change boundary of AgNO₃. **Construction and Building Materials**, Ed. Elsevier, 2011.

HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livre docência), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; HELENE, P.; ISAIA, G. C. High-volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol. 25, n. 3, March, 2013.

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

HUSSAIN, S. E.; RASHEEDUZZAFAR. Corrosion resistance performance of fly ash blended cement concrete. **ACI Materials Journal**, vol. 91, n. 3, p. 264-272, may-june, 1994.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapa de densidade populacional de 2010. Disponível em: http://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/mapas_murais/densidade_populacional_2010.pdf. Acesso em: 05 de maio de 2014.

LENCIONI, J. W., LIMA, A. G. Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto – Estado-da-Arte . **VI Congresso**

Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, Córdoba, Argentina, 2010.

LEOCINI, J. W. **Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios**. Tese (doutorado), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011.

LOUNIS, Z. Reliability-based life prediction of aging concrete bridge decks. National Research Council Canada. **NRCC 44246. Proceedings of the International RILEM Workshop on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures**, Cannes, France, 2000.

LUPING, T.; NILSSON, L. Rapid determination of the chloride diffusivity test in concrete by applying an electrical field. **ACI Materials Journal**, v. 89, n.1, p. 49-53, 1992.

MARCONDES, G. N. **Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland – absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

MARRIAGA, J. L.; CLAISSE, P. Influencia de la adición de escoria de alto horno en la penetración de los cloruros en el concreto. **Ingeniería e investigación**, v.31, p. 38-47, 2011.

MEDEIROS JR, R. A. **Estudo da resistividade do concreto para proposta de modelagem de vida útil – corrosão de armaduras devido à penetração de cloretos**. Tese (Doutorado, qualificação), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo, 2013.

MEDEIROS JR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista Alconpat**, 2014.

MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção de superficial frente à ação de íons cloreto**. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

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

MEDEIROS, M. H. F., PEREIRA, E., HELENE, P. Tratamento de superfície com silicato de sódio para concreto: penetração de cloretos e absorção de água. **Revista ALCONPAT**, Vol. 2, pp. 157-169, 2012.

MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V.; RICHTER, C.; SOUZA, W.; KLEIN, N. S. Ensaio de migração de cloretos em estado estacionário para avaliação de sistemas de proteção de superfície. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 8, p. 54-63, 2014.

MEDINA, E. A.. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

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

MORRIS, W.; VICO, M.; VASQUEZ, M.; SANCHEZ, S. R. Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements. **Corrosion science**, v. 44, p. 81-99, 2002.

PEREIRA, L. F. C.; CINCOTTO, M. A. **Determinação de cloretos em concreto de cimentos Portland: influência do tipo de cimento**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PFEIFER, D. W.; PERENCHIO, W.F.; HIME, W. G. A critique of the limits ACI 318 Chloride Limits. In: **PCI Journal**. March-April, 1992.

REAL, L. V.; MEDEIROS, M. H. F. Influência do teor de cloretos na resistividade elétrica do concreto. In: **X Congresso Internacional sobre Patologia y Recuperación de Estructuras**: Cinpar, Santiago, Chile, 2014.

REAL, L. V.; SOARES, T.; BOLA, D. R.; MEDEIROS, M. H. F. Avaliação da penetração de cloretos em concreto através do método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata. In: **1º Congresso Brasileiro de Patologia das Construções**, Foz do Iguaçu, 2014.

REDAELLI, E.; BERTOLINI, E.; PEELEN, L.; POLDER, R. FEM-models for propagation period of chloride induced reinforcement corrosion. **Materials and Corrosion**, n. 8, p. 628-635, 2006.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. t. **Estatística Industrial**. Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

ROBSON, C. **Real world research: a resource for social scientists and practitioner-researchers**. 2 ed. Malden: Blackwell Publishers, 2002.

SANTOR, M. S. **Influência de materiais de proteção superficial na resistividade elétrica e na absorção capilar do concreto**. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a avaliação da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto armado**. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Brasília, Distrito Federal, 2006.

SIQUEIRA, H.C. **Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria – RS – 2008.

SOARES, T.; REAL, L. V.; MEDEIROS, M.H.F. Discussão sobre o teor crítico de íons cloreto para despassivação da armadura do concreto. **1º Congresso Brasileiro de Patologia das Construções**, Foz do Iguaçu, 2014.

TORRES, A. S. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise**. Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2011.

TRINDADE, G. H. **Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem: mitigação da reação álcali-sílica e penetração de cloretos**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

UNE 83988-2: Determinación de la Resistividade Eléctrica – Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner, Espanha, 2012.

UNE-EN 83987: Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro en el hormigón endurecido. Método multiregimen, Espanha, 2012.

VARELA, D H.; GONZALEZ, M J. Algunos parametros que permiten una evaluación in situ de la corrosión de armadura en obras civiles de hormigón armado. **Congreso Nacional de la Construcción**, Viña del Mar, 1990.

WEE, T H. SURYAVANSHI, A K. TIN, S S. Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) results for concrete containing mineral admixtures. **ACI Mater, Journal**, v. 92, p. 221–231, 2000.

XU, Jinxia; JIANG, Linhua; WANG, Weilun e JIAN, Yu. Influence of CaCl_2 and NaCl from different sources on chloride threshold value for corrosion of steel reinforcement in concrete. In: **Construction and Building Materials**. Ed. Elsevier. Ago. 2010.

YU, Hui; CHIANG, Kuang-Tsan K.; YANG, Lietai. Threshold chloride level and characteristics of reinforcement corrosion initiation in simulated concrete pore solutions. In: **Construction and Building Materials**. Ed. Elsevier. Jul. 2011.

APÊNDICES

APÊNDICE 01 – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

Tabela 39 – Resultados de resistência à compressão sem eliminação dos dados espúrios

Traços	TCV30		TCPIV		TSA		TSCA		TM		TCV10		TCPII		TCPV	
	28	56	28	56	28	56	28	56	28	56	28	56	28	56	28	56
CP 1	47,0	61,9	52,1	66,7	84,1	92,9	57,4	68,0	64,7	69,1	60,4	45,9	46,1	43,0	61,7	68,6
CP 2	42,2	63,1	54,6	68,1	83,5	91,3	63,9	59,7	64,1	73,5	59,5	64,6	48,1	52,0	66,7	70,6
CP 3	45,3	59,6	46,4	69,3	85,1	87,8	63,0	58,8	67,3	70,4	63,2	63,7	50,1	52,9	69,8	71,7
CP 4	44,6	61,3	51,4	64,2	85,2	94,6	63,4	74,8	69,5	65,9	62,3	62,2	48,5	48,3	63,2	73,5
CP 5	43,7	63,3	50,7	68,4	87,2	92,6	63,5	64,8	68,4	76,3	64,6	59,6	47,5	48,6	66,2	70,9
CP 6	45,4	57,7	56,6	64,4	86,4	86,6	57,4	67,5	70,4	66,6	37,6	64,3	45,8	56,7	67,9	71,0
$f_{c_{\text{médio}}}$	45	61	52	67	85	91	61	66	67	70	58	60	48	50	66	71
sd	1,6	2,1	3,5	2,1	1,4	3,1	3,1	5,9	2,5	4,0	10,1	7,2	1,6	4,7	3,0	1,6
C.V.	4%	4%	7%	3%	2%	3%	5%	9%	4%	6%	17%	12%	3%	9%	5%	2%
$f_{c_{\text{médio}}} - \text{sd}$	43,1	59,0	48,5	64,7	83,9	87,9	58,3	59,7	64,9	66,3	47,8	52,9	46,1	45,5	62,9	69,5
$f_{c_{\text{médio}}} + \text{sd}$	46,3	63,3	55,5	69,0	86,6	94,1	64,6	71,5	69,9	74,3	68,1	67,2	49,3	55,0	68,9	72,6

Tabela 40 - Resultados de resistência à compressão com eliminação dos dados espúrios

Traços	TCV10	
	28	56
CP 1	60,4	
CP 2	59,5	64,6
CP 3	63,2	63,7
CP 4	62,3	62,2
CP 5	64,6	59,6
CP 6		64,3
$f_{c_{\text{médio}}}$	62,0	62,9
sd	2,1	2,0
C.V.	3%	3%

APÊNDICE 02 – TESTE DE TUKEY PARA RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

Tabela 41 – Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para resistências à compressão aos 28 dias

Diferença entre as médias	Limite de decisão	Conclusão
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 7,3$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TCV30} - Y_{TSA} = 40,6$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TCV30} - Y_{TSCA} = 16,7$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TCV30} - Y_{TM} = 22,7$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TCV30} - Y_{TCV10} = 13,2$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 3,0$	$< Ld = 5,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistências.
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 21,2$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TCPV} - Y_{TSA} = 33,3$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TCPV} - Y_{TSCA} = 9,4$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TCPV} - Y_{TM} = 15,4$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TCPV} - Y_{TCV10} = 4,3$	$< Ld = 5,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistências.
$Y_{TCPV} - Y_{TCPV} = 4,3$	$< Ld = 5,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistências.
$Y_{TCPV} - Y_{TCPV} = 13,9$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TSA} - Y_{TSCA} = 23,8$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TSA} - Y_{TM} = 17,9$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TSA} - Y_{TCV10} = 27,3$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TSA} - Y_{TCPV} = 37,6$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TSA} - Y_{TCPV} = 19,3$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TSCA} - Y_{TM} = 6,0$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TSCA} - Y_{TCV10} = 3,5$	$< Ld = 5,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistências.
$Y_{TSCA} - Y_{TCPV} = 13,7$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TSCA} - Y_{TCPV} = 4,5$	$< Ld = 5,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistências.
$Y_{TM} - Y_{TCV10} = 9,5$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TM} - Y_{TCPV} = 19,7$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TM} - Y_{TCPV} = 1,5$	$< Ld = 5,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistências.
$Y_{TCV10} - Y_{TCPV} = 10,3$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TCV10} - Y_{TCPV} = 8,0$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.
$Y_{TCPV} - Y_{TCPV} = 18,2$	$> Ld = 5,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistências.

Tabela 42 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para resistências à compressão aos 56 dias

Diferença entre as médias	Limite de decisão	Conclusão
$y_{TCV30} - y_{TCPV} = 5,7$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TCV30} - y_{TSA} = 29,8$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TCV30} - y_{TSCA} = 4,4$	$< Ld = 5,2$ ∴	Diferença não significativa entre as resistências.
$y_{TCV30} - y_{TM} = 9,2$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TCV30} - y_{TCV10} = 1,1$	$< Ld = 5,2$ ∴	Diferença não significativa entre as resistências.
$y_{TCV30} - y_{TCPV} = 10,9$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TCV30} - y_{TCPV} = 9,9$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TCPV} - y_{TSA} = 24,1$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TCPV} - y_{TSCA} = 1,3$	$< Ld = 5,2$ ∴	Diferença não significativa entre as resistências.
$y_{TCPV} - y_{TM} = 3,4$	$< Ld = 5,2$ ∴	Diferença não significativa entre as resistências.
$y_{TCPV} - y_{TCV10} = 6,8$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TCPV} - y_{TCPV} = 16,6$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TCPV} - y_{TCPV} = 4,2$	$< Ld = 5,2$ ∴	Diferença não significativa entre as resistências.
$y_{TSA} - y_{TSCA} = 25,4$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TSA} - y_{TM} = 20,7$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TSA} - y_{TCV10} = 30,9$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TSA} - y_{TCPV} = 40,7$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TSA} - y_{TCPV} = 19,9$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TSCA} - y_{TM} = 4,7$	$< Ld = 5,2$ ∴	Diferença não significativa entre as resistências.
$y_{TSCA} - y_{TCV10} = 5,5$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TSCA} - y_{TCPV} = 15,3$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TSCA} - y_{TCPV} = 5,5$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TM} - y_{TCV10} = 10,3$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TM} - y_{TCPV} = 20,1$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TM} - y_{TCPV} = 0,7$	$< Ld = 5,2$ ∴	Diferença não significativa entre as resistências.
$y_{TCV10} - y_{TCPV} = 9,8$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TCV10} - y_{TCPV} = 11,0$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.
$y_{TCPV} - y_{TCPV} = 20,8$	$> Ld = 5,2$ ∴	Diferença significativa entre as resistências.

APÊNDICE 03 – ABSORÇÃO POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

Tabela 43 - Resultados de absorção por imersão e índice de vazios

Traços	TCV30					TCPIV				
Amostra	m _{seca}	m _{saturada}	m _{submersa}	A	I _{vazios}	m _{seca}	m _{saturada}	m _{submersa}	A	I _{vazios}
1	3594,93	3716,24	2136,43	3,26%	7,68%	3622,69	3716,30	2138,64	2,52%	5,93%
2	3595,95	3716,96	2141,28	3,26%	7,68%	3619,58	3717,21	2132,33	2,63%	6,16%
3	3650,80	3765,96	2178,68	3,06%	7,26%	3618,42	3707,96	2140,61	2,41%	5,71%
4	3605,96	3726,56	2142,75	3,24%	7,61%	3612,58	3706,68	2138,42	2,54%	6,00%
médias	3611,9	3731,4	2149,8	3,20%	7,56%	3618,3	3712,0	2137,5	2,52%	5,95%
sd	26,4	23,5	19,5	0,1%	0,2%	4,2	5,5	3,6	0,1%	0,2%
C.V.	1%	1%	1%	3%	3%	0%	0%	0%	3%	3%
Traços	TSA					TSCA				
Amostra	m _{seca}	m _{saturada}	m _{submersa}	A	I _{vazios}	m _{seca}	m _{saturada}	m _{submersa}	A	I _{vazios}
1	3663,64	3740,13	2165,01	2,05%	4,86%	3539,41	3670,56	2096,55	3,57%	8,33%
2	3654,15	3727,59	2153,93	1,97%	4,67%	3500,09	3624,82	2075,48	3,44%	8,05%
3	3643,14	3710,21	2136,84	1,81%	4,26%	3539,34	3657,65	2095,14	3,23%	7,57%
4	3616,01	3700,93	2133,05	2,29%	5,42%	3518,41	3640,84	2078,79	3,36%	7,84%
médias	3644,2	3719,7	2147,2	2,03%	4,80%	3524,3	3648,5	2086,5	3,40%	7,95%
sd	20,6	17,5	14,9	0,2%	0,5%	18,9	19,9	10,9	0,1%	0,3%
C.V.	1%	0%	1%	10%	10%	1%	1%	1%	4%	4%
Traços	TM					TCV10				
Amostra	m _{seca}	m _{saturada}	m _{submersa}	A	I _{vazios}	m _{seca}	m _{saturada}	m _{submersa}	A	I _{vazios}
1	3617,65	3754,81	2168,48	3,65%	8,65%	3569,68	3700,94	2130,27	3,55%	8,36%
2	3627,29	3745,78	2156,47	3,16%	7,46%	3570,25	3708,76	2145,55	3,73%	8,86%
3	3610,23	3743,15	2161,56	3,55%	8,40%	3578,74	3715,53	2142,78	3,68%	8,70%
4	3624,77	3761,51	2168,78	3,64%	8,59%	3580,02	3721,45	2145,66	3,80%	8,98%
médias	3620,0	3751,3	2163,8	3,50%	8,27%	3574,7	3711,7	2141,1	3,69%	8,72%
sd	7,7	8,4	5,9	0,2%	0,6%	5,5	8,8	7,3	0,1%	0,3%
C.V.	0%	0%	0%	7%	7%	0%	0%	0%	3%	3%
Traços	TCPII					TCPV				
Amostra	m _{seca}	m _{saturada}	m _{submersa}	A	I _{vazios}	m _{seca}	m _{saturada}	m _{submersa}	A	I _{vazios}
1	3542,56	3714,70	2148,98	4,63%	10,99%	3596,85	3725,22	2155,63	3,45%	8,18%
2	3542,47	3726,41	2152,36	4,94%	11,69%	3627,64	3751,14	2169,07	3,29%	7,81%
3	3530,16	3707,50	2150,07	4,78%	11,39%	3584,21	3724,42	2161,12	3,76%	8,97%
4	3531,75	3710,60	2139,92	4,82%	11,39%	3612,43	3751,01	2174,73	3,69%	8,79%
médias	3536,7	3714,8	2147,8	4,79%	11,36%	3605,3	3737,9	2165,1	3,55%	8,44%
sd	6,7	8,3	5,5	0,1%	0,3%	18,9	15,2	8,4	0,2%	0,5%
C.V.	0%	0%	0%	3%	2%	1%	0%	0%	6%	6%

APÊNDICE 04 – TESTE DE TUKEY PARA ABSORÇÃO POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

Tabela 44 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para absorção por imersão

Diferença entre as médias	Limite de decisão	Conclusão
$Y_{TCV30} - Y_{TCPIV} = 0,7\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV30} - Y_{TSA} = 1,2\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV30} - Y_{TSCA} = 0,2\%$	$< Ld = 0,24\%$	Diferença não significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV30} - Y_{TM} = 0,3\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV30} - Y_{TCV10} = 0,5\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV30} - Y_{TCPII} = 1,6\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 0,3\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCPIV} - Y_{TSA} = 0,5\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCPIV} - Y_{TSCA} = 0,9\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCPIV} - Y_{TM} = 1,0\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCPIV} - Y_{TCV10} = 1,2\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCPIV} - Y_{TCPII} = 2,3\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCPIV} - Y_{TCPV} = 1,0\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSA} - Y_{TSCA} = 1,4\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSA} - Y_{TM} = 1,5\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSA} - Y_{TCV10} = 1,7\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSA} - Y_{TCPII} = 2,8\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSA} - Y_{TCPV} = 1,5\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSCA} - Y_{TM} = 0,1\%$	$< Ld = 0,24\%$	Diferença não significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSCA} - Y_{TCV10} = 0,3\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSCA} - Y_{TCPII} = 1,4\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSCA} - Y_{TCPV} = 0,1\%$	$< Ld = 0,24\%$	Diferença não significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TM} - Y_{TCV10} = 0,2\%$	$< Ld = 0,24\%$	Diferença não significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TM} - Y_{TCPII} = 1,3\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TM} - Y_{TCPV} = 0,0\%$	$< Ld = 0,24\%$	Diferença não significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV10} - Y_{TCPII} = 1,1\%$	$> Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV10} - Y_{TCPV} = 0,1\%$	$< Ld = 0,24\%$	Diferença não significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCPII} - Y_{TCPV} = 1,2\%$	$< Ld = 0,24\%$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.

Tabela 45 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para índice de vazios

Diferença entre as médias	Limite de decisão	Conclusão
$Y_{TCV30} - Y_{TCPIV} = 1,6\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TCV30} - Y_{TSA} = 2,8\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TCV30} - Y_{TSCA} = 0,4\%$	$< Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença não significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TCV30} - Y_{TM} = 0,7\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TCV30} - Y_{TCV10} = 1,2\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TCV30} - Y_{TCPII} = 3,8\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 0,9\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TCPIV} - Y_{TSA} = 1,2\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TCPIV} - Y_{TSCA} = 2,0\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TCPIV} - Y_{TM} = 2,3\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TCPIV} - Y_{TCV10} = 2,8\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TCPIV} - Y_{TCPII} = 5,4\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TCPIV} - Y_{TCPV} = 2,5\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TSA} - Y_{TSCA} = 3,1\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TSA} - Y_{TM} = 3,5\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TSA} - Y_{TCV10} = 3,9\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TSA} - Y_{TCPII} = 6,6\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TSA} - Y_{TCPV} = 3,6\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TSCA} - Y_{TM} = 0,3\%$	$< Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença não significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TSCA} - Y_{TCV10} = 0,8\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TSCA} - Y_{TCPII} = 3,4\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TSCA} - Y_{TCPV} = 0,5\%$	$< Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença não significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TM} - Y_{TCV10} = 0,4\%$	$< Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença não significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TM} - Y_{TCPII} = 3,1\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TM} - Y_{TCPV} = 0,2\%$	$< Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença não significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TCV10} - Y_{TCPII} = 2,6\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TCV10} - Y_{TCPV} = 0,3\%$	$< Ld = 0,47\% \therefore$	Diferença não significativa entre os índices de vazios.
$Y_{TCPII} - Y_{TCPV} = 2,9\%$	$> Ld = 0,57\% \therefore$	Diferença significativa entre os índices de vazios.

APÊNDICE 05 – ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Tabela 46 - Absorção por capilaridade sem eliminação dos dados espúrios

TCV30												
Amostra	m _{seca}	m _{3h}	m _{6h}	m _{24h}	m _{48h}	m _{72h}	C _{3h}	C _{6h}	C _{24h}	C _{48h}	C _{72h}	
1	3591,63	3603,14	3607,40	3617,10	3623,83	3626,04	0,15	0,20	0,32	0,41	0,44	
2	3583,62	3594,66	3598,63	3607,36	3614,06	3616,00	0,14	0,19	0,30	0,39	0,41	
3	3566,41	3578,75	3583,11	3592,60	3599,31	3600,36	0,16	0,21	0,33	0,42	0,43	
4	3596,45	3607,00	3611,12	3619,91	3625,43	3626,74	0,13	0,19	0,30	0,37	0,39	
							C _{médio}	0,14	0,20	0,31	0,40	0,42
							sd	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
							C.V.	7%	6%	5%	6%	6%

TCPIV												
Amostra	m _{seca}	m _{3h}	m _{6h}	m _{24h}	m _{48h}	m _{72h}	C _{3h}	C _{6h}	C _{24h}	C _{48h}	C _{72h}	
1	3605,95	3611,08	3613,01	3618,10	3622,69	3624,62	0,07	0,09	0,15	0,21	0,24	
2	3619,98	3625,33	3627,75	3633,41	3638,13	3639,98	0,07	0,10	0,17	0,23	0,25	
3	3616,66	3621,99	3624,06	3629,78	3634,10	3635,77	0,07	0,09	0,17	0,22	0,24	
4	3620,92	3626,28	3628,16	3633,10	3637,10	3638,63	0,07	0,09	0,16	0,21	0,23	
							C _{médio}	0,07	0,09	0,16	0,22	0,24
							sd	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
							C.V.	2%	4%	5%	5%	5%

TSA												
Amostra	m _{seca}	m _{3h}	m _{6h}	m _{24h}	m _{48h}	m _{72h}	C _{3h}	C _{6h}	C _{24h}	C _{48h}	C _{72h}	
1	3643,14	3646,60	3648,05	3652,28	3654,20	3654,92	0,04	0,06	0,12	0,14	0,15	
2	3663,64	3666,58	3668,09	3672,46	3674,48	3675,31	0,04	0,06	0,11	0,14	0,15	
3	3654,15	3657,45	3659,12	3663,48	3665,81	3666,99	0,04	0,06	0,12	0,15	0,16	
4	3626,01	3628,58	3630,04	3634,15	3635,80	3636,59	0,03	0,05	0,10	0,12	0,13	
							C _{médio}	0,04	0,06	0,11	0,14	0,15
							sd	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
							C.V.	13%	10%	6%	7%	8%

TSCA												
Amostra	m _{seca}	m _{3h}	m _{6h}	m _{24h}	m _{48h}	m _{72h}	C _{3h}	C _{6h}	C _{24h}	C _{48h}	C _{72h}	
1	3539,41	3549,77	3551,43	3556,84	3559,90	3561,60	0,13	0,15	0,22	0,26	0,28	
2	3518,40	3530,56	3533,37	3542,13	3546,29	3548,27	0,15	0,19	0,30	0,36	0,38	
3	3500,09	3509,56	3511,34	3519,06	3523,37	3525,32	0,12	0,14	0,24	0,30	0,32	
4	3539,34	3550,10	3552,26	3559,56	3563,22	3564,89	0,14	0,16	0,26	0,30	0,33	
							C _{médio}	0,14	0,16	0,26	0,30	0,33
							sd	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04
							C.V.	10%	13%	13%	13%	12%

TM

Amostra	m _{seca}	m _{3h}	m _{6h}	m _{24h}	m _{48h}	m _{72h}	C _{3h}	C _{6h}	C _{24h}	C _{48h}	C _{72h}	
1	3617,65	3628,85	3631,15	3639,57	3643,86	3646,15	0,14	0,17	0,28	0,33	0,36	
2	3610,23	3621,26	3623,51	3631,55	3635,56	3637,39	0,14	0,17	0,27	0,32	0,35	
3	3624,77	3631,59	3633,30	3640,35	3644,27	3646,33	0,09	0,11	0,20	0,25	0,27	
4	3627,29	3635,88	3637,81	3645,27	3649,19	3650,98	0,11	0,13	0,23	0,28	0,30	
							C _{médio}	0,12	0,15	0,24	0,30	0,32
							sd	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
							C.V.	22%	21%	15%	13%	13%

TCV10

Amostra	m _{seca}	m _{3h}	m _{6h}	m _{24h}	m _{48h}	m _{72h}	C _{3h}	C _{6h}	C _{24h}	C _{48h}	C _{72h}	
1	3570,25	3574,24	3575,42	3581,01	3584,80	3586,94	0,05	0,07	0,14	0,19	0,21	
2	3569,68	3574,58	3576,13	3582,87	3588,33	3592,21	0,06	0,08	0,17	0,24	0,29	
3	3578,74	3582,67	3584,05	3590,64	3595,29	3598,26	0,05	0,07	0,15	0,21	0,25	
4	3580,02	3589,08	3591,27	3599,36	3603,49	3605,63	0,12	0,14	0,25	0,30	0,33	
							C _{médio}	0,07	0,09	0,18	0,23	0,27
							sd	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05
							C.V.	44%	41%	28%	21%	18%

TCP11

Amostra	m _{seca}	m _{3h}	m _{6h}	m _{24h}	m _{48h}	m _{72h}	C _{3h}	C _{6h}	C _{24h}	C _{48h}	C _{72h}	
1	3534,75	3542,73	3545,29	3554,27	3559,79	3562,59	0,10	0,13	0,25	0,32	0,35	
2	3542,47	3551,78	3553,65	3560,13	3563,71	3565,32	0,12	0,14	0,22	0,27	0,29	
3	3542,56	3549,45	3551,21	3557,77	3561,70	3563,89	0,09	0,11	0,19	0,24	0,27	
4	3530,16	3538,14	3540,30	3548,36	3553,07	3555,58	0,10	0,13	0,23	0,29	0,32	
							C _{médio}	0,10	0,13	0,22	0,28	0,31
							sd	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04
							C.V.	12%	11%	10%	11%	12%

TCPV

Amostra	m _{seca}	m _{3h}	m _{6h}	m _{24h}	m _{48h}	m _{72h}	C _{3h}	C _{6h}	C _{24h}	C _{48h}	C _{72h}	
1	3612,43	3621,57	3623,76	3631,87	3638,21	3641,79	0,12	0,14	0,25	0,33	0,37	
2	3596,85	3604,42	3606,32	3613,76	3618,85	3621,95	0,10	0,12	0,22	0,28	0,32	
3	3627,64	3634,14	3636,10	3643,71	3650,02	3653,95	0,08	0,11	0,20	0,28	0,33	
4	3584,21	3590,86	3592,48	3598,79	3603,50	3606,28	0,08	0,11	0,19	0,25	0,28	
							C _{médio}	0,10	0,12	0,21	0,28	0,33
							sd	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04
							C.V.	16%	15%	12%	12%	12%

Tabela 47 - Absorção por capilaridade com eliminação dos dados espúrios

TSA												
Amostra	m _{seca}	m _{3h}	m _{6h}	m _{24h}	m _{48h}	m _{72h}	C _{3h}	C _{6h}	C _{24h}	C _{48h}	C _{72h}	
1	3643,14	3646,60	3648,05	3652,28	3654,20	3654,92	0,04	0,06	0,12	0,14	0,15	
2	3663,64	3666,58	3668,09	3672,46	3674,48	3675,31	0,04	0,06	0,11	0,14	0,15	
3	3654,15	3657,45	3659,12	3663,48	3665,81	3666,99	0,04	0,06	0,12	0,15	0,16	
4	3626,01	3628,58	3630,04	3634,15	3635,80	3636,59		0,05	0,10	0,12	0,13	
							C _{médio}	0,04	0,06	0,11	0,14	0,15
							sd	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
							C.V.	8%	10%	6%	7%	8%

TSCA												
Amostra	m _{seca}	m _{3h}	m _{6h}	m _{24h}	m _{48h}	m _{72h}	C _{3h}	C _{6h}	C _{24h}	C _{48h}	C _{72h}	
1	3539,41	3549,77	3551,43	3556,84	3559,90	3561,60	0,13	0,15	0,22	0,26	0,28	
2	3518,40	3530,56	3533,37	3542,13	3546,29	3548,27						
3	3500,09	3509,56	3511,34	3519,06	3523,37	3525,32	0,12	0,14	0,24	0,30	0,32	
4	3539,34	3550,10	3552,26	3559,56	3563,22	3564,89	0,14	0,16	0,26	0,30	0,33	
							C _{médio}	0,13	0,15	0,24	0,29	0,31
							sd	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
							C.V.	6%	7%	7%	8%	8%

TM												
Amostra	m _{seca}	m _{3h}	m _{6h}	m _{24h}	m _{48h}	m _{72h}	C _{3h}	C _{6h}	C _{24h}	C _{48h}	C _{72h}	
1	3617,65	3628,85	3631,15	3639,57	3643,86	3646,15	0,14	0,17	0,28	0,33	0,36	
2	3610,23	3621,26	3623,51	3631,55	3635,56	3637,39	0,14	0,17	0,27	0,32	0,35	
3	3624,77	3631,59	3633,30	3640,35	3644,27	3646,33						
4	3627,29	3635,88	3637,81	3645,27	3649,19	3650,98						
							C _{médio}	0,14	0,17	0,28	0,33	0,35
							sd	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
							C.V.	1%	1%	2%	2%	3%

TCV10												
Amostra	m _{seca}	m _{3h}	m _{6h}	m _{24h}	m _{48h}	m _{72h}	C _{3h}	C _{6h}	C _{24h}	C _{48h}	C _{72h}	
1	3570,25	3574,24	3575,42	3581,01	3584,80	3586,94	0,05	0,07	0,14	0,19	0,21	
2	3569,68	3574,58	3576,13	3582,87	3588,33	3592,21						
3	3578,74	3582,67	3584,05	3590,64	3595,29	3598,26	0,05	0,07	0,15	0,21	0,25	
4	3580,02	3589,08	3591,27	3599,36	3603,49	3605,63						
							C _{médio}	0,05	0,07	0,14	0,20	0,23
							sd	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03
							C.V.	1%	2%	7%	9%	11%

TCP II												
Amostra	m _{seca}	m _{3h}	m _{6h}	m _{24h}	m _{48h}	m _{72h}	C _{3h}	C _{6h}	C _{24h}	C _{48h}	C _{72h}	
1	3534,75	3542,73	3545,29	3554,27	3559,79	3562,59	0,10	0,13	0,25	0,32	0,35	
2	3542,47	3551,78	3553,65	3560,13	3563,71	3565,32	0,12	0,14	0,22	0,27	0,29	
3	3542,56	3549,45	3551,21	3557,77	3561,70	3563,89						
4	3530,16	3538,14	3540,30	3548,36	3553,07	3555,58	0,10	0,13	0,23	0,29	0,32	
							C _{médio}	0,11	0,14	0,24	0,29	0,32
							sd	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03
							C.V.	9%	5%	5%	8%	10%

TCP V												
Amostra	m _{seca}	m _{3h}	m _{6h}	m _{24h}	m _{48h}	m _{72h}	C _{3h}	C _{6h}	C _{24h}	C _{48h}	C _{72h}	
1	3612,43	3621,57	3623,76	3631,87	3638,21	3641,79						
2	3596,85	3604,42	3606,32	3613,76	3618,85	3621,95	0,10	0,12	0,22	0,28	0,32	
3	3627,64	3634,14	3636,10	3643,71	3650,02	3653,95	0,08	0,11	0,20	0,28	0,33	
4	3584,21	3590,86	3592,48	3598,79	3603,50	3606,28	0,08	0,11				
							C _{médio}	0,09	0,11	0,21	0,28	0,33
							sd	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
							C.V.	8%	7%	4%	1%	3%

APÊNDICE 06 – TESTE DE TUKEY PARA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Tabela 48 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para absorção por capilaridade

Diferença entre as médias	Limite de decisão	Conclusão
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 0,18$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV30} - Y_{TSA} = 0,27$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV30} - Y_{TSCA} = 0,09$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV30} - Y_{TM} = 0,10$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV30} - Y_{TCV10} = 0,15$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 0,11$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 0,09$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCPV} - Y_{TSA} = 0,09$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCPV} - Y_{TSCA} = 0,09$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCPV} - Y_{TM} = 0,08$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCPV} - Y_{TCV10} = 0,03$	$< Ld = 0,05 \therefore$	Diferença não significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCPV} - Y_{TCPV} = 0,07$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCPV} - Y_{TCPV} = 0,09$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSA} - Y_{TSCA} = 0,18$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSA} - Y_{TM} = 0,17$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSA} - Y_{TCV10} = 0,12$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSA} - Y_{TCPV} = 0,16$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSA} - Y_{TCPV} = 0,18$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSCA} - Y_{TM} = 0,01$	$< Ld = 0,05 \therefore$	Diferença não significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSCA} - Y_{TCV10} = 0,06$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSCA} - Y_{TCPV} = 0,02$	$< Ld = 0,05 \therefore$	Diferença não significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TSCA} - Y_{TCPV} = 0,00$	$< Ld = 0,05 \therefore$	Diferença não significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TM} - Y_{TCV10} = 0,05$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TM} - Y_{TCPV} = 0,01$	$< Ld = 0,05 \therefore$	Diferença não significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TM} - Y_{TCPV} = 0,01$	$< Ld = 0,05 \therefore$	Diferença não significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV10} - Y_{TCPV} = 0,04$	$< Ld = 0,05 \therefore$	Diferença não significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCV10} - Y_{TCPV} = 0,06$	$> Ld = 0,05 \therefore$	Diferença significativa entre as porcentagens de absorção.
$Y_{TCPV} - Y_{TCPV} = 0,02$	$< Ld = 0,05 \therefore$	Diferença não significativa entre as porcentagens de absorção.

APÊNDICE 07 – RESISTIVIDADES ELÉTRICAS PARA DIFERENTES ADIÇÕES E TIPOS DE CIMENTO

Tabela 49 – Resistividade elétrica para diferentes adições e tipos de cimento

Idade	Resistividade elétrica (kΩ.cm)																																							
	TCV30					TCPIV					TSA					TSCA					TM				TC10				TCP II				TCPV							
7 dias	5,4	4,8	5,2	5,0	4,6	5,4	4,9	4,7	4,8	5,3	15,9	15,2	13,9	15,3	15,2	11,5	9,4	11,1	12,3	11,7	14,0	15,5	14,2	13,7	14,8	6,5	6,9	6,5	7,2	6,9	4,7	5,1	4,8	4,6	4,6	8,3	8,2	8,0	7,6	7,8
	5,2	5,6	5,2	4,9	5,2	5,8	5,5	4,8	5,0	5,1	16,5	15,7	14,5	14,5	13,0	11,5	11,4	11,5	11,9	12,1	13,1	13,9	14,8	14,5	15,4	6,6	7,3	6,4	7,1	6,3	4,7	4,7	4,5	4,9	4,7	8,0	7,5	7,9	7,9	7,5
	5,4	4,9	4,8	4,9	5,7	5,7	4,9	5,2	5,3	5,2	16,2	14,7	14,9	13,7	13,9	11,3	11,0	11,5	13,2	12,3	13,7	14,5	14,8	13,5	14,0	6,4	7,2	6,4	6,9	6,6	4,9	4,6	4,6	4,6	4,7	7,4	8,5	8,6	7,6	7,8
	5,4	5,0	5,0	5,4	5,4	5,6	5,2	5,0	5,1	5,2	15,9	15,2	14,3	14,9	13,7	12,1	10,4	10,8	11,3	11,5	12,5	14,0	14,5	14,0	13,0	6,7	7,3	6,7	6,8	6,3	5,4	5,2	4,7	4,8	4,5	8,0	8,5	8,3	8,2	7,3
	5,0	4,8	5,0	4,7	4,6	4,7	5,8	4,8	5,2	5,2	16,4	16,2	13,7	14,6	12,2	12,0	12,4	13,5	10,7	11,1	14,6	12,2	12,9	14,8	14,9	6,3	7,0	6,7	7,6	6,1	5,3	5,1	4,4	4,2	4,2	7,2	10,1	7,5	8,0	7,5
	5,2	5,3	5,4	5,2	4,8	5,7	5,4	6,7	5,5	6,0	16,1	16,8	15,8	16,0	14,2	11,1	10,6	13,6	11,7	12,1	13,9	13,3	13,4	13,6	13,0	7,1	6,9	6,5	6,5	6,7	5,1	5,1	6,0	4,7	4,9	7,8	7,0	7,4	7,9	8,1
28 dias	9,6	10,6	9,7	10,1	9,4	16,3	14,7	15,5	15,0	15,5	55,2	66,4	56,5	64,5	59,5	24,0	25,3	27,2	25,0	25,7	17,7	18,8	18,1	18,7	16,8	9,1	9,9	9,4	10,0	10,5	9,5	9,0	9,6	8,4	8,4	10,6	11,6	11,6	10,5	10,0
	9,7	10,1	10,1	10,5	10,2	14,5	16,0	16,3	14,5	16,6	67,1	65,2	60,8	66,8	65,5	25,6	25,6	24,7	26,5	25,4	18,0	17,9	19,5	19,5	19,1	11,4	13,7	11,3	9,0	11,2	9,5	9,2	9,3	8,4	9,7	11,2	12,1	10,0	10,1	10,9
	10,9	10,2	10,1	9,9	10,4	17,2	15,0	15,9	15,5	15,7	63,9	64,4	60,8	64,0	63,0	23,9	25,0	24,6	25,4	26,5	18,3	19,5	19,1	19,4	18,8	8,5	10,2	15,0	9,1	12,3	8,8	9,2	9,5	9,0	8,9	10,7	11,1	10,9	10,2	10,5
	10,1	9,0	9,5	9,7	10,0	19,7	16,4	14,8	16,0	16,1	60,0	65,8	58,5	64,3	66,6	26,8	25,2	25,4	25,7	26,1	18,5	19,6	17,5	17,6	16,9	10,2	13,0	8,0	10,9	11,8	9,1	9,8	9,5	8,5	8,9	10,2	10,8	11,4	10,7	10,5
	10,1	9,7	10,2	10,0	10,2	13,1	16,0	16,1	14,7	15,4	61,9	65,2	55,9	73,4	59,8	26,1	24,1	27,5	28,9	25,2	20,1	17,6	18,1	19,0	19,8	9,2	11,2	8,5	11,6	15,1	9,9	8,7	8,2	7,8	8,1	10,0	10,6	10,0	10,0	10,4
	9,9	10,2	9,7	9,3	10,1	16,9	15,0	16,1	15,5	16,6	63,7	70,1	60,8	72,9	65,3	24,4	24,0	25,8	24,4	27,0	18,9	17,6	17,9	17,9	16,8	10,6	9,4	10,3	8,5	13,3	9,2	9,3	9,5	8,5	9,6	11,2	10,6	10,0	11,5	10,5
56 dias	17,8	19,3	19,2	19,3	19,1	32,7	30,8	31,4	31,6	30,1	84,7	82,5	79,4	84,9	73,4	46,7	42,7	44,7	47,3	45,9	20,6	23,1	20,4	22,5	21,9	10,9	12,4	11,7	12,0	8,3	17,8	17,1	15,6	14,9	16,1	12,8	13,0	13,8	13,0	12,6
	19,6	18,2	19,4	19,0	19,1	34,7	29,8	29,5	30,3	31,3	85,6	91,0	79,4	84,8	89,8	48,9	44,1	46,5	49,6	46,6	20,6	22,9	20,7	20,3	21,7	12,2	10,9	13,2	14,3	11,5	17,4	17,2	19,8	16,6	17,1	12,4	12,9	14,1	11,6	12,2
	19,7	19,6	17,2	19,3	19,9	35,4	30,2	28,6	30,9	30,8	90,6	81,9	76,3	83,5	75,0	40,6	43,4	43,9	45,1	48,7	22,1	21,2	21,8	21,2	20,3	11,7	10,1	14,3	14,3	8,9	17,6	16,9	17,7	16,0	15,6	12,7	12,7	11,5	12,5	12,2
	19,9	19,9	19,2	17,2	19,2	32,4	31,5	28,8	27,2	31,7	87,4	88,7	81,8	86,5	80,0	42,7	41,9	46,3	46,7	45,4	22,1	22,7	21,7	20,6	20,6	11,9	13,7	11,8	13,1	11,7	17,8	17,4	17,4	15,9	17,1	13,4	12,5	13,4	13,5	12,8
	19,0	18,3	17,0	19,4	19,6	28,8	28,8	28,9	27,2	31,7	94,1	88,7	81,8	86,5	80,0	49,1	48,6	49,5	48,4	42,6	22,2	24,1	23,0	22,5	22,8	12,4	10,6	11,8	12,5	8,1	16,6	17,8	17,0	15,8	17,1	12,0	12,9	11,7	12,0	11,7
	19,3	19,3	18,4	19,4	21,2	34,2	31,4	33,4	33,4	33,5	106,2	94,0	84,5	94,2	76,6	44,3	40,4	47,4	44,0	42,8	21,3	22,7	20,5	20,6	19,6	14,4	13,0	12,7	12,5	10,5	17,7	16,4	17,5	16,4	16,6	12,8	13,0	12,1	14,3	12,7
91 dias	32,5	31,5	31,7	33,2	33,3	54,9	45,3	49,7	47,4	51,9	96,3	90,6	92,7	88,7	93,3	63,0	61,7	59,6	62,3	63,0	23,2	24,2	24,8	24,0	22,8	17,8	18,8	16,2	18,6	16,5	25,1	25,9	25,4	24,3	23,9	13,3	14,8	15,4	14,7	13,6
	31,7	30,5	28,3	32,2	31,8	51,0	45,8	45,9	45,9	48,7	95,0	84,8	92,1	99,6	88,2	64,6	60,1	59,4	61,1	63,8	24,9	25,1	25,5	24,3	23,7	15,9	19,3	18,7	17,7	17,1	27,3	26,2	25,9	24,2	24,8	13,8	15,3	13,6	13,5	13,5
	33,1	31,1	30,3	30,3	33,6	52,1	46,7	47,4	42,6	50,0	99,0	97,1	92,0	89,7	93,9	56,0	58,3	59,8	62,6	59,2	24,8	25,6	23,7	24,5	25,5	16,3	18,6	18,0	18,6	17,1	26,6	24,9	24,0	24,9	26,1	14,0	15,7	12,9	14,4	14,0
	30,5	31,9	30,3	31,2	33,6	51,9	50,3	47,4	46,9	47,1	98,7	95,1	92,0	88,2	85,8	57,2	61,4	65,5	61,4	62,4	24,2	24,9	24,1	26,4	24,5	17,6	17,9	17,2	18,5	17,4	26,3	26,6	25,7	24,4	24,6	14,4	14,7	14,6	15,1	14,8
	31,7	28,3	33,8	31,8	28,4	44,7	48,3	43,5	45,9	49,8	97,8	94,1	87,9	91,4	93,8	63,0	66,1	63,5	50,6	61,3	25,2	25,0	24,8	25,0	25,5	17,5	17,4	16,1	16,8	15,2	25,1	25,1	22,7	21,4	23,9	12,9	13,2	13,0	12,3	12,8
	33,0	29,2	29,2	35,2	30,3	54,4	50,7	54,9	53,6	49,4	105,5	100,4	96,9	103,8	83,5	61,3	57,3	61,7	60,5	61,0	24,1	24,3	24,3	23,7	21,6	17,6	19,1	16,1	17,1	18,3	24,7	25,6	26,8	22,4	25,4	13,6	15,1	12,9	14,4	14,9

Tabela 50 – Médias, desvios padrão e coeficientes de variação para as resistividades elétricas com diferentes adições e tipos de cimento

Traços	Resistividade elétrica (kΩ.cm)																															
	TCV30				TCPIV				TSA				TSCA				TM				TC10				TCP II				TCPV			
Idade (dias)	7	28	56	91	7	28	56	91	7	28	56	91	7	28	56	91	7	28	56	91	7	28	56	91	7	28	56	91	7	28	56	91
$\rho_{\text{médio}}$	5	10	19	31	5	16	31	49	15	64	85	94	12	26	45	61	14	18	22	24	7	11	12	18	5	9	17	25	8	11	13	14
sd	0,3	0,4	0,9	1,8	0,4	1,1	2,1	3,3	1,1	4,4	6,8	5,3	0,9	1,2	2,7	3,1	0,8	0,9	1,1	0,9	0,4	1,9	1,6	1,0	0,4	0,6	0,9	1,3	0,6	0,6	0,7	0,9
C.V.	6%	4%	5%	6%	8%	7%	7%	7%	8%	7%	8%	6%	8%	5%	6%	5%	6%	5%	5%	4%	5%	17%	14%	6%	8%	6%	6%	5%	7%	5%	6%	6%
$\rho_{\text{médio}} - \text{sd}$	4,8	9,6	18,2	29,6	4,9	14,6	28,9	45,5	13,8	59,2	78,3	88,3	10,7	24,4	42,8	57,9	13,1	17,5	20,5	23,5	6,4	8,9	10,3	16,5	4,4	8,5	16,0	23,7	7,3	10,1	12,0	13,1
$\rho_{\text{médio}} + \text{sd}$	5,4	10,4	20,0	33,3	5,7	16,9	33,1	52,1	16,1	68,0	92,0	98,9	12,5	26,7	48,2	64,0	14,8	19,4	22,7	25,4	7,1	12,6	13,6	18,5	5,2	9,6	17,9	26,3	8,5	11,3	13,4	14,9

Tabela 51 – Resistividades elétricas após eliminação de dados espúrios – cimentos e adições pozolânicas

Resistividade elétrica (kΩ.cm)					
Idade	TC10				
28 dias	9,1	9,9	9,4	10,0	10,5
	11,4		11,3	9,0	11,2
		10,2		9,1	12,3
	10,2			10,9	11,8
	9,2	11,2		11,6	
	10,6	9,4	10,3		
$\rho_{\text{médio}}$	10				
sd	1,0				
C.V.	10%				
56 dias	10,9	12,4	11,7	12,0	
	12,2	10,9	13,2		11,5
	11,7				
	11,9		11,8	13,1	11,7
	12,4	10,6	11,8	12,5	
		13,0	12,7	12,5	10,5
$\rho_{\text{médio}}$	12				
sd	0,8				
C.V.	7%				

APÊNDICE 08 – TESTES DE TUKEY PARA RESISTIVIDADES ELÉTRICAS COM DIFERENTES ADIÇÕES E TIPOS DE CIMENTO

Tabela 52 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para resistividade elétrica aos 7 dias

Diferença entre as médias	Limite de decisão	Conclusão
$y_{TCV30} - y_{TCPV} = 0,2$	$< Ld = 1,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistividades.
$y_{TCV30} - y_{TSA} = 9,9$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TCV30} - y_{TSCA} = 6,5$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TCV30} - y_{TM} = 8,9$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TCV30} - y_{TCV10} = 1,6$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TCV30} - y_{TCPV} = 0,3$	$< Ld = 1,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistividades.
$y_{TCV30} - y_{TCPV} = 2,8$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TCPV} - y_{TSA} = 9,7$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TCPV} - y_{TSCA} = 6,3$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TCPV} - y_{TM} = 8,7$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TCPV} - y_{TCV10} = 1,5$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TCPV} - y_{TCPV} = 0,5$	$< Ld = 1,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistividades.
$y_{TCPV} - y_{TCPV} = 2,6$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TSA} - y_{TSCA} = 3,3$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TSA} - y_{TM} = 1,0$	$< Ld = 1,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistividades.
$y_{TSA} - y_{TCV10} = 8,2$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TSA} - y_{TCPV} = 10,2$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TSA} - y_{TCPV} = 7,1$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TM} - y_{TCV10} = 7,2$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TM} - y_{TCPV} = 9,2$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TM} - y_{TCPV} = 6,1$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TCV10} - y_{TCPV} = 1,9$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$y_{TCV10} - y_{TCPV} = 1,2$	$< Ld = 1,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistividades.
$y_{TCPV} - y_{TCPV} = 3,1$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.

Tabela 53 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para resistividade elétrica aos 28 dias

Diferença entre as médias	Limite de decisão	Conclusão
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 5,8$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TSA} = 53,6$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TSCA} = 15,6$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TM} = 8,5$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TCV10} = 0,8$	$< Ld = 1,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 0,9$	$< Ld = 1,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 0,7$	$< Ld = 1,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TSA} = 47,8$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TSCA} = 9,8$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TM} = 2,7$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TCV10} = 5,0$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TCPV} = 6,7$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TCPV} = 5,1$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSA} - Y_{TSCA} = 38,0$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSA} - Y_{TM} = 45,2$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSA} - Y_{TCV10} = 52,9$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSA} - Y_{TCPV} = 54,6$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSA} - Y_{TCPV} = 52,9$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TM} - Y_{TCV10} = 7,7$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TM} - Y_{TCPV} = 9,4$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TM} - Y_{TCPV} = 7,8$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV10} - Y_{TCPV} = 1,7$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV10} - Y_{TCPV} = 0,1$	$< Ld = 1,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TCPV} = 1,6$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.

Tabela 54 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para resistividade elétrica aos 56 dias

Diferença entre as médias	Limite de decisão	Conclusão
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 12,0$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TSA} = 66,1$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TSCA} = 26,4$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TM} = 2,5$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TCV10} = 7,2$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 2,1$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 6,4$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TSA} = 54,1$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TSCA} = 14,5$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TM} = 9,4$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TCV10} = 19,1$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TCPV} = 14,1$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TCPV} = 18,3$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSA} - Y_{TSCA} = 39,6$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSA} - Y_{TM} = 63,5$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSA} - Y_{TCV10} = 73,2$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSA} - Y_{TCPV} = 68,2$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSA} - Y_{TCPV} = 72,4$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSCA} - Y_{TM} = 23,9$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSCA} - Y_{TCV10} = 33,6$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSCA} - Y_{TCPV} = 28,6$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSCA} - Y_{TCPV} = 32,8$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TM} - Y_{TCV10} = 9,7$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TM} - Y_{TCPV} = 4,7$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TM} - Y_{TCPV} = 8,9$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV10} - Y_{TCPV} = 5,0$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV10} - Y_{TCPV} = 0,8$	$< Ld = 1,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TCPV} = 4,2$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.

Tabela 55 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para resistividade elétrica aos 91 dias

Diferença entre as médias	Limite de decisão	Conclusão
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 17,4$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TSA} = 62,1$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TSCA} = 29,5$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TM} = 7,0$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TCV10} = 14,0$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 6,4$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV30} - Y_{TCPV} = 17,4$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TSA} = 44,8$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TSCA} = 12,2$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TM} = 24,3$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TCV10} = 31,3$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TCPV} = 23,8$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TCPV} = 34,8$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSA} - Y_{TSCA} = 32,6$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSA} - Y_{TM} = 69,1$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSA} - Y_{TCV10} = 76,1$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSA} - Y_{TCPV} = 68,6$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TSA} - Y_{TCPV} = 79,6$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TM} - Y_{TCV10} = 7,0$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TM} - Y_{TCPV} = 0,5$	$< Ld = 1,2 \therefore$	Diferença não significativa entre as resistividades.
$Y_{TM} - Y_{TCPV} = 10,4$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV10} - Y_{TCPV} = 7,5$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCV10} - Y_{TCPV} = 3,5$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.
$Y_{TCPV} - Y_{TCPV} = 11,0$	$> Ld = 1,2 \therefore$	Diferença significativa entre as resistividades.

APÊNDICE 09 – RESISTIVIDADES ELÉTRICAS PARA DIFERENTES TEORES DE ADITIVO

Tabela 56 – Resistividade elétricas para diferentes teores de aditivo

		Resistividade elétrica (kΩ.cm)																																							
		Teor de aditivos (%)																																							
Idade		0,5					0,75					1					1,25					1,5					1,75					2					2,25				
7 dias		7,1	6,7	7,0	7,2	6,7	5,5	5,4	6,1	6,4	5,0	7,2	7,2	7,6	6,9	7,5	6,4	7,3	7,7	7,0	7,8	4,6	5,1	5,2	5,1	5,6	5,2	6,2	5,4	4,4	6,1	4,6	4,5	4,9	4,0	5,0	5,6	5,1	5,7	6,9	5,7
		6,7	6,4	7,2	7,2	6,4	5,8	5,3	6,0	6,3	4,6	7,2	7,1	7,2	6,7	6,8	6,6	6,6	7,6	7,1	7,0	4,7	4,8	5,6	5,3	5,8	5,6	5,5	5,5	5,1	5,5	4,5	4,5	4,9	4,4	4,8	5,3	5,1	5,9	6,9	5,7
		6,8	6,3	7,0	6,6	7,1	5,3	5,3	5,6	6,4	4,8	7,3	6,9	7,6	7,1	7,3	7,0	7,2	7,0	6,9	7,2	4,8	4,8	5,2	4,7	5,7	5,5	5,2	5,3	5,7	5,9	4,4	4,6	4,6	4,6	4,6	5,4	5,4	5,3	7,0	5,5
		6,8	6,3	6,7	6,8	7,1	5,1	5,5	6,1	6,3	5,2	7,0	6,7	7,3	7,4	7,0	7,3	6,9	7,0	7,2	6,5	4,9	5,4	5,2	5,1	5,4	5,5	5,7	5,9	5,3	6,0	4,6	4,5	4,0	4,2	4,7	5,6	4,8	5,3	6,8	5,1
		7,1	6,8	7,0	6,8	6,9	5,4	5,2	6,5	6,1	5,2	7,3	7,1	7,2	6,9	6,9	6,8	6,7	7,7	6,9	7,3	5,0	5,9	5,0	4,9	4,8	5,2	5,3	5,5	5,7	6,7	4,4	4,6	4,3	4,3	4,6	4,8	5,0	5,4	6,0	5,4
		7,1	7,1	6,9	6,7	6,9	5,7	5,7	6,2	6,0	5,3	6,0	6,6	7,4	7,0	7,2	7,0	6,8	7,3	6,4	7,6	4,8	5,4	4,9	4,7	4,9	5,1	5,7	5,9	5,2	6,4	4,5	4,6	3,8	4,4	4,5	4,8	5,0	5,3	6,3	5,3
r _m		6,9					5,6					7,1					7,1					5,1					5,6					4,5					5,6				
sd		0,3					0,5					0,3					0,4					0,4					0,4					0,3					0,6				
CV		4%					9%					5%					5%					7%					8%					6%					11%				
28 dias		9,2	10,2	9,8	9,7	9,5	7,8	7,8	8,1	7,6	8,3	11,8	12,4	13,0	11,8	12,6	10,0	10,4	11,4	10,0	11,2	7,6	8,8	7,8	7,8	8,5	8,2	9,1	7,6	10,1	8,3	6,9	6,4	7,2	6,7	7,0	8,6	8,0	7,6	9,3	8,3
		9,6	9,5	9,4	9,5	9,1	8,1	7,8	7,7	7,6	7,9	11,2	12,2	12,6	11,7	12,6	10,6	9,4	11,0	10,4	10,6	8,1	9,3	8,0	8,0	7,9	7,6	9,6	8,2	9,3	9,0	6,7	6,5	6,9	6,6	7,1	8,3	7,7	8,1	9,1	7,8
		9,7	9,7	10,2	9,6	10,0	7,7	7,9	8,0	7,5	8,0	12,3	12,6	12,9	11,5	12,0	10,8	10,6	10,0	11,0	10,3	8,1	8,7	8,4	8,1	8,3	8,0	8,6	8,7	9,0	9,2	7,0	6,5	6,4	6,8	6,5	8,4	8,0	8,0	8,9	7,7
		9,2	10,0	9,8	9,8	10,2	7,5	7,5	7,9	7,2	8,0	12,4	11,7	11,7	11,5	12,6	11,1	10,4	10,7	10,9	11,1	8,0	8,4	8,1	8,1	8,0	8,5	8,7	8,3	9,0	9,2	7,0	6,4	6,7	6,8	6,5	8,6	7,8	7,9	8,4	8,0
		9,7	10,5	9,8	9,7	9,9	7,8	7,4	7,7	7,8	8,0	12,3	12,7	13,4	12,3	12,9	10,2	10,3	10,8	10,9	11,4	8,1	8,2	8,8	7,4	8,1	8,6	8,4	8,5	9,3	9,9	6,6	6,4	6,9	6,6	6,6	8,2	7,5	8,3	8,4	7,6
		9,6	10,7	9,9	10,2	9,5	8,2	7,8	8,0	7,9	7,5	10,2	12,7	12,6	11,9	12,9	10,4	10,5	11,1	10,2	11,4	11,5	8,9	8,0	7,5	8,8	8,8	8,7	7,8	9,3	9,2	7,0	6,2	7,1	7,0	6,5	8,4	7,4	7,8	8,4	8,2
r _m		9,8					7,8					12,2					10,6					8,3					8,8					6,7					8,2				
sd		0,4					0,3					0,6					0,5					0,7					0,6					0,3					0,5				
CV		4%					3%					5%					5%					9%					7%					4%					6%				
56 dias		11,6	12,2	11,4	11,7	11,7	9,0	9,2	8,1	9,3	8,4	14,3	17,5	18,2	16,3	17,0	12,1	13,1	13,9	12,1	17,0	9,1	10,8	9,8	9,1	10,3	11,3	10,4	9,0	11,0	11,3	7,8	7,5	8,3	8,2	7,9	9,3	8,6	8,5	9,7	8,9
		12,3	11,9	10,3	12,1	10,7	8,9	9,3	9,2	8,9	9,3	17,0	17,3	17,3	16,1	17,5	12,9	12,7	13,1	12,4	17,5	9,2	11,3	9,3	9,6	10,0	10,4	10,7	9,5	10,5	10,4	7,8	8,0	7,9	7,7	7,7	9,4	8,6	9,0	9,6	8,6
		10,9	10,6	12,5	12,1	12,3	8,7	8,7	8,7	9,0	8,8	16,7	17,6	17,0	15,4	18,1	12,4	12,4	12,9	13,2	18,1	9,8	10,7	9,6	9,7	9,9	10,7	10,3	9,8	10,6	11,1	7,8	7,4	7,4	8,0	8,0	9,5	9,1	8,8	9,3	8,4
		12,2	11,0	11,3	11,3	12,1	8,6	8,6	9,5	8,5	8,9	17,7	16,5	16,6	16,0	16,8	13,0	12,1	12,7	13,1	16,8	10,0	10,3	10,6	9,6	10,6	9,4	10,3	10,0	11,0	10,7	7,6	8,0	7,3	7,9	7,4	9,2	8,9	8,5	9,3	8,4
		11,6	11,2	12,0	10,1	11,4	8,7	8,9	8,7	8,6	8,9	16,4	16,8	18,1	16,4	17,5	13,7	12,4	12,3	13,6	17,5	10,4	10,7	10,2	9,8	10,6	9,1	10,5	9,7	11,4	11,2	7,7	8,3	7,8	8,4	7,5	8,8	8,7	8,5	9,6	8,1
		11,2	11,1	11,9	11,2	10,4	9,2	9,2	8,4	8,8	8,4	16,4	16,4	17,3	15,8	18,0	12,9	12,4	13,5	13,6	18,0	9,9	10,7	11,3	9,3	10,6	9,9	11,5	9,4	11,3	11,6	7,4	8,0	8,3	8,8	8,1	9,1	8,7	8,5	9,4	8,7
r _m		11,5					8,8					16,9					13,8					10,1					10,5					7,9					8,9				
sd		0,6					0,3					0,9					1,9					0,6					0,7					0,3					0,4				
CV		6%					4%					5%					14%					6%					7%					4%					5%				

Tabela 57 – Resistividades elétricas após eliminação de dados espúrios - aditivo

Resistividade elétrica (kΩ.cm)					
Idade	1,25 % de aditivo				
56 dias	12,1	13,1	13,9	12,1	
	12,9	12,7	13,1	12,4	
	12,4	12,4	12,9	13,2	
	13,0	12,1	12,7	13,1	
	13,7	12,4	12,3	13,6	
	12,9	12,4	13,5	13,6	
ρ_m	12,9				
sd	0,5				
CV	4%				

APÊNDICE 10 – RESISTIVIDADES ELÉTRICAS PARA DIFERENTES TEORES DE CLORETO

Tabela 58 - Resistividade elétrica para diferentes teores de cloreto

Resistividade elétrica (kΩ.cm)															
Idade (A)	Teor de cloretos														
	0			1%			2%			3%			4%		
28 dias	9,5	7,6	8,2	10,3	9,1	10,9	11,0	10,3	10,6	7,4	6,7	6,3	6,6	6,4	5,8
	7,6	7,9	8,7	10,6	9,0	9,6	8,4	9,4	10,0	6,6	5,8	6,6	6,3	6,1	5,6
	7,9	8,9	8,5	9,7	10,2	9,1	11,3	8,9	9,6	7,6	6,7	6,9	6,4	5,4	5,2
	8,4	8,0	8,7	8,2	9,3	9,1	8,1	8,2	8,5	7,6	6,7	6,6	6,0	7,1	5,7
	8,3	9,0	7,8	9,0	9,6	9,0	9,9	10,1	8,6	7,4	6,8	6,9	7,7	5,8	5,6
	8,2	8,5	8,2	9,2	10,1	9,5	9,0	8,2	9,6	7,5	6,9	6,9	5,1	7,6	5,9
	8,8	7,0	8,5	10,1	10,1	9,0	10,1	8,9	9,4	8,2	8,4	7,4	9,4	6,2	5,7
	8,2	8,0	8,2	9,7	8,9	9,7	9,4	7,8	9,0	8,5	6,8	7,0	5,9	8,9	5,5
ρ_m	8,3			9,5			9,3			7,1			6,3		
sd	0,5			0,6			0,9			0,6			1,1		
CV	6%			7%			10%			9%			17%		
63 dias	11,8	11,2	12,3	13,4	14,8	15,3	13,1	12,0	11,0	10,1	10,8	10,2	7,4	7,5	7,8
	11,8	12,8	11,4	12,9	13,4	14,9	11,7	13,6	11,6	10,1	10,9	10,0	7,7	7,8	7,7
	13,3	13,7	12,2	13,8	13,0	13,7	13,2	10,7	11,6	10,6	9,6	10,1	7,3	7,5	7,4
	11,7	12,4	12,8	13,3	12,1	14,2	10,6	11,2	12,3	9,6	9,7	10,3	7,8	7,2	7,6
	12,1	11,3	12,4	12,0	12,4	13,9	11,9	12,3	11,0	10,3	9,8	9,6	7,9	7,3	7,0
	12,1	12,1	11,5	13,4	13,0	12,7	13,0	11,4	13,7	9,0	10,6	8,9	7,2	8,0	7,4
	12,2	11,1	10,9	14,3	13,7	12,9	11,1	11,7	11,8	9,1	9,0	8,9	7,8	7,5	8,0
	12,1	12,8	10,5	13,6	14,3	13,5	12,3	11,8	11,1	8,0	10,6	9,9	8,1	7,7	7,6
ρ_m	12,0			13,5			11,9			9,8			7,6		
sd	0,8			0,8			0,9			0,7			0,3		
CV	6%			6%			7%			7%			4%		
91 dias	16,0	15,7	16,5	17,9	16,8	17,2	16,5	16,3	14,8	12,2	10,0	10,3	9,4	9,7	9,0
	15,8	15,5	15,8	18,9	17,8	18,6	15,4	15,7	14,5	11,7	13,5	11,6	8,7	9,5	9,1
	16,7	16,8	15,8	16,1	16,1	17,2	14,8	15,2	13,7	11,2	11,5	11,6	9,3	9,5	8,4
	15,1	16,7	14,0	16,1	17,7	15,9	16,1	15,0	16,6	11,8	12,4	12,0	9,1	9,4	9,5
	14,3	15,8	15,2	16,8	16,6	16,5	14,8	14,2	15,9	11,0	12,1	11,3	9,0	8,3	9,0
	16,0	18,7	16,0	18,0	18,0	16,2	13,8	16,4	13,1	13,1	13,2	12,7	8,7	9,5	9,5
	14,8	15,5	16,3	17,8	16,6	17,8	15,8	16,8	14,2	11,9	11,6	11,5	9,2	8,9	9,3
	14,3	17,6	15,5	16,6	17,5	17,0	16,7	14,3	15,3	12,3	13,6	11,1	9,6	9,8	9,0
ρ_m	15,9			17,2			15,2			11,9			9,2		
sd	1,0			0,8			1,1			0,9			0,4		
CV	7%			5%			7%			8%			4%		

Tabela 59 – Resistividades elétricas após eliminação de dados espúrios - cloretos

Resistividade elétrica (kΩ.cm)			
Idade	4% de cloretos		
28 dias	6,6	6,4	5,8
	6,3	6,1	5,6
	6,4	5,4	5,2
	6,0	7,1	5,7
	5,9	5,8	5,6
	6,2	5,7	5,9
			5,5
ρ_m	6,0		
sd	0,5		
CV	8%		

APÊNDICE 11 – TESTE DE TUKEY PARA RESISTIVIDADES ELÉTRICAS COM DIFERENTES TEORES DE CLORETO

Tabela 60 - Comparação de múltiplas médias (Teste de Tukey) para resistividade elétrica com adição de cloretos

Idade	Diferença entre as médias	Limite de decisão	Conclusão
28 dias	$y_{0\%} - y_{1\%} = 1,3 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{0\%} - y_{2\%} = 1,1 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{0\%} - y_{3\%} = 1,2 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{0\%} - y_{4\%} = 1,9 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{1\%} - y_{2\%} = 0,2 < Ld = 0,5$		Diferença não significativa entre as resistividades.
	$y_{1\%} - y_{3\%} = 2,5 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{1\%} - y_{4\%} = 3,2 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{2\%} - y_{3\%} = 2,3 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{2\%} - y_{4\%} = 3,0 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{3\%} - y_{4\%} = 0,8 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
63 dias	$y_{0\%} - y_{1\%} = 1,3 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{0\%} - y_{2\%} = 0,1 < Ld = 0,5$		Diferença não significativa entre as resistividades.
	$y_{0\%} - y_{3\%} = 2,2 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{0\%} - y_{4\%} = 4,4 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{1\%} - y_{2\%} = 1,6 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{1\%} - y_{3\%} = 3,7 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{1\%} - y_{4\%} = 5,9 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{2\%} - y_{3\%} = 2,1 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{2\%} - y_{4\%} = 4,3 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{3\%} - y_{4\%} = 2,2 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
91 dias	$y_{0\%} - y_{1\%} = 1,3 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{0\%} - y_{2\%} = 0,6 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{0\%} - y_{3\%} = 4,0 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{0\%} - y_{4\%} = 6,7 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{1\%} - y_{2\%} = 1,9 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{1\%} - y_{3\%} = 5,3 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{1\%} - y_{4\%} = 8,0 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{2\%} - y_{3\%} = 3,4 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{2\%} - y_{4\%} = 6,1 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.
	$y_{3\%} - y_{4\%} = 2,7 > Ld = 0,5$		Diferença significativa entre as resistividades.

APÊNDICE 12 – RESULTADOS DO ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS NO ESTADO NÃO ESTACIONÁRIO

Tabela 61 – Corrente passante média ao longo do tempo e por traço

Tempo (horas)	Corrente passante (mA)																							
	TCV30			TCPIV			TSA			TSCA			TM			TCV10			TCPII			TCPV		
	I _{média}	sd	C.V.	I _{média}	sd	C.V.	I _{média}	sd	C.V.	I _{média}	sd	C.V.	I _{média}	sd	C.V.	I _{média}	sd	C.V.	I _{média}	sd	C.V.	I _{média}	sd	C.V.
0	33	2,5	8%	22	0,7	3%	6	0,1	1%	20	1,1	5%	22	1,7	7%	40	2,4	6%	42	1,1	3%	41	1,7	4%
0,5	34	2,1	6%	22	0,7	3%	6	0,5	7%	20	1,0	5%	23	1,7	8%	40	2,5	6%	43	1,5	3%	41	2,1	5%
1	35	2,2	6%	23	0,6	2%	6	0,1	2%	20	0,9	5%	23	1,4	6%	45	2,0	5%	49	1,7	3%	47	2,1	4%
1,5	35	2,1	6%	24	0,8	3%	6	0,1	2%	21	1,0	5%	24	1,6	7%	47	3,2	7%	50	1,8	4%	48	1,6	3%
2	36	2,2	6%	24	0,8	3%	6	0,1	2%	21	1,0	5%	24	1,5	6%	47	2,9	6%	51	1,9	4%	48	1,6	3%
2,5	37	2,3	6%	25	0,7	3%	6	0,1	2%	21	0,9	4%	24	1,7	7%	47	3,0	6%	51	1,7	3%	49	2,0	4%
3	39	2,1	5%	25	0,8	3%	6	0,1	2%	22	1,1	5%	25	1,6	7%	48	3,2	7%	53	2,1	4%	49	1,8	4%
3,6	39	2,2	6%	26	0,8	3%	6	0,1	2%	22	1,1	5%	25	1,6	7%	49	3,2	7%	53	2,1	4%	48	3,0	6%
4	40	2,2	5%	26	0,8	3%	6	0,2	3%	22	1,0	5%	25	1,8	7%	49	3,2	6%	54	2,1	4%	50	1,8	4%
4,5	41	2,2	5%	27	0,8	3%	6	0,2	3%	23	1,2	5%	26	1,6	6%	50	3,2	6%	56	2,3	4%	51	1,9	4%
5	42	2,3	6%	28	0,9	3%	6	0,2	3%	23	1,2	5%	26	1,7	6%	50	3,4	7%	56	2,1	4%	51	1,8	4%
5,5	42	2,4	6%	28	0,8	3%	6	0,2	3%	23	1,1	5%	26	1,8	7%	48	4,8	10%	56	2,3	4%	52	2,0	4%
6	43	2,3	5%	28	0,8	3%	6	0,2	2%	23	1,2	5%	26	1,6	6%	51	3,1	6%	57	2,2	4%	52	2,1	4%
6,5	43	2,3	5%	28	0,9	3%	6	0,2	3%	23	1,1	5%	26	1,7	6%	51	3,1	6%	57	2,1	4%	52	1,9	4%
7	43	2,4	6%	28	0,6	2%	6	0,2	2%	23	1,1	5%	26	1,6	6%	51	3,3	6%	57	2,1	4%	52	2,2	4%
7,5	44	2,3	5%	29	0,9	3%	6	0,2	3%	23	1,1	5%	26	1,6	6%	51	3,1	6%	57	2,4	4%	53	2,7	5%
8	44	2,3	5%	29	0,7	3%	6	0,1	2%	23	1,2	5%	26	1,6	6%	51	3,1	6%	58	2,5	4%	52	2,0	4%
8,5	44	2,5	6%	29	0,8	3%	6	0,2	3%	23	1,2	5%	26	1,5	6%	51	3,2	6%	58	2,5	4%	52	2,2	4%
9	44	2,5	6%	29	0,9	3%	6	0,1	2%	23	1,1	5%	25	1,5	6%	51	3,1	6%	58	2,5	4%	51	3,0	6%
9,5	44	2,4	6%	29	0,9	3%	6	0,2	2%	23	1,1	5%	25	1,5	6%	51	3,1	6%	58	2,7	5%	52	2,5	5%
10	44	2,5	6%	29	0,8	3%	6	0,2	3%	22	1,2	5%	25	1,5	6%	51	3,0	6%	58	2,6	5%	52	2,4	5%
10,5	44	2,4	6%	29	0,9	3%	6	0,2	3%	23	1,2	5%	25	1,5	6%	51	3,3	6%	58	2,7	5%	51	2,2	4%
11	44	2,2	5%	29	0,9	3%	6	0,2	3%	22	1,3	6%	25	1,5	6%	51	3,3	6%	58	2,7	5%	51	2,2	4%
11,5	43	2,5	6%	29	0,9	3%	6	0,2	3%	22	1,2	6%	25	1,4	6%	51	3,3	6%	58	2,7	5%	51	2,2	4%
12	43	2,3	5%	28	0,8	3%	6	0,1	2%	22	1,2	5%	25	1,5	6%	51	3,3	6%	58	2,7	5%	51	2,2	4%

Tabela 62 – Carga acumulada média ao longo do tempo e por traço

Tempo (horas)	Carga acumulada (Coulombs)							
	TCV30	TCPIV	TSA	TSCA	TM	TCV10	TCPII	TCPV
	e _{acumulada}	e _{acumulada}	e _{acumulada}	e _{acumulada}	e _{acumulada}	e _{acumulada}	e _{acumulada}	e _{acumulada}
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	60	40	11	36	40	72	76	74
1	122	81	22	73	82	149	158	153
1,5	185	123	33	110	124	231	247	238
2	249	165	44	148	166	315	337	324
2,5	315	209	54	186	210	400	429	411
3	383	254	65	225	253	486	522	500
3,6	453	300	76	264	298	574	618	587
4	525	347	87	304	343	662	714	675
4,5	598	395	98	345	388	751	813	766
5	672	444	109	387	435	841	913	858
5,5	747	494	119	428	481	930	1013	951
6	823	545	130	470	528	1019	1115	1044
6,5	901	596	141	511	575	1111	1217	1138
7	979	647	152	553	621	1204	1319	1232
7,5	1057	699	163	594	668	1296	1422	1327
8	1136	750	174	635	714	1388	1525	1421
8,5	1215	802	185	675	760	1481	1629	1515
9	1294	855	196	716	806	1573	1734	1608
9,5	1373	907	207	757	851	1664	1838	1701
10	1452	959	218	797	897	1756	1942	1794
10,5	1531	1011	229	838	943	1847	2046	1886
11	1609	1063	240	878	989	1939	2149	1979
11,5	1687	1114	251	918	1034	2030	2253	2071
12	1765	1166	262	958	1079	2121	2357	2164

Tabela 63 – Coeficientes de difusão no estado não estacionário (aparente)

Coeficiente de difusão no estado não estacionário (m²/ano)								
Amostra	TCV30	TCPIV	TSA	TSCA	TM	TCV10	TCPII	TCPV
1	9,42E-11	5,92E-11	1,35E-11	6,86E-11	5,95E-11	8,27E-11	9,66E-11	8,68E-11
2	9,57E-11	6,99E-11	1,55E-11	5,86E-11	6,02E-11	8,34E-11	9,50E-11	8,69E-11
3	1,04E-10	6,96E-11	1,60E-11	6,11E-11	5,34E-11	7,93E-11	9,08E-11	8,69E-11
4	9,62E-11	6,16E-11	1,53E-11	5,64E-11	1,48E-11	8,55E-11	9,66E-11	8,49E-11
D _{ap} médio	9,75E-11	6,51E-11	1,51E-11	6,12E-11	4,70E-11	8,27E-11	9,48E-11	8,64E-11
sd	4,28E-12	5,49E-12	1,09E-12	5,31E-12	2,16E-11	2,57E-12	2,75E-12	1,00E-12
C.V.	4,4%	8%	7%	9%	46%	3%	3%	1%

Tabela 64 - Coeficiente de difusão no estado não estacionário para o traço TM após eliminação de dados espúrios

Coeficiente de difusão no estado não estacionário (m²/ano)	
Amostra	TM
1	5,95E-11
2	6,02E-11
3	5,34E-11
4	
D _{ap} médio	5,77E-11
sd	3,72E-12
C.V.	6%

Tabela 65 – Profundidade de penetração de cloretos no ensaio de migração

Profundidade de penetração de cloretos (mm)											
Traço	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅	e ₆	e ₇	e ₈	e ₉	e ₁₀	e _{média}
CV30	26	20	28	18	31	19	23	27	30	27	25
	29	27	26	17	33	26	23	26	26	28	26
	23	32	26	37	37	31	-	39	39	14	31
	32	16	28	29	27	25	20	29	29	28	26
CPIV	12	10	14	9	16	7	6	12	8	6	10
	15	18	16	11	12	11	10	14	15	16	14
	15	14	12	10	18	12	17	19	13	7	14
	12	13	12	9	-	8	6	17	15	5	11
TSA	-	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	0,7
	0,7	0,7	0,8	0,9	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9
	1,0	0,8	0,9	1,0	0,7	1,3	0,9	1,1	0,7	0,7	0,9
	0,9	0,7	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	0,7	0,8	0,8	0,8
TSCA	11	17	15	11	12	9	21	11	14	11	13
	11	5	11	12	11	11	8	9	9	11	10
	11	10	11	12	10	11	10	10	11	10	11
	10	7	10	8	7	9	-	11	10	10	9
TM	12	10	12	10	9	9	10	9	10	9	10
	11	9	12	12	10	12	8	12	5	12	10
	9	7	3	10	11	5	9	9	8	11	8
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TCV10	16	21	12	17	23	15	12	23	29	23	19
	13	16	19	18	22	20	24	24	18	22	20
	18	17	20	20	20	16	15	19	14	18	18
	21	17	23	20	24	20	14	24	22	21	21
TCP II	27	26	31	21	24	20	20	34	30	30	26
	19	25	22	30	30	20	20	30	30	30	26
	22	25	32	30	12	24	16	26	25	21	23
	26	16	33	27	30	16	25	27	28	37	27
TCPV	17	22	30	26	21	15	19	25	18	18	21
	19	25	33	21	12	15	21	27	23	17	21
	18	20	22	20	27	18	23	26	23	16	21
	15	23	25	21	18	19	19	20	22	21	20

APÊNDICE 13 – TESTE DE TUKEY PARA COEFICIENTES DE DIFUSÃO NO ESTADO NÃO ESTACIONÁRIO

Tabela 66 - Teste de Tukey para coeficientes de difusão

Diferença entre as médias	Limite de decisão	Conclusão
$y_{TCV30} - y_{TCPV} = 3E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TCV30} - y_{TSA} = 8E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TCV30} - y_{TSCA} = 4E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TCV30} - y_{TM} = 4E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TCV30} - y_{TCV10} = 1E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TCV30} - y_{TCPV} = 3E-08$	$< Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença não significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TCV30} - y_{TCPV} = 1E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TCPV} - y_{TSA} = 5E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TCPV} - y_{TSCA} = 4E-08$	$< Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença não significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TCPV} - y_{TM} = 7E-08$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TCPV} - y_{TCV10} = 2E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TCPV} - y_{TCPV} = 3E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TCPV} - y_{TCPV} = 2E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TSA} - y_{TSCA} = 5E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TSA} - y_{TM} = 4E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TSA} - y_{TCV10} = 7E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TSA} - y_{TCPV} = 8E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TSA} - y_{TCPV} = 7E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TSCA} - y_{TM} = 4E-08$	$< Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença não significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TSCA} - y_{TCV10} = 2E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TSCA} - y_{TCPV} = 8E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TSCA} - y_{TCPV} = 7E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TM} - y_{TCV10} = 3E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TM} - y_{TCPV} = 4E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TM} - y_{TCPV} = 3E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TCV10} - y_{TCPV} = 1E-07$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TCV10} - y_{TCPV} = 4E-08$	$< Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença não significativa entre os coeficientes de difusão.
$y_{TCPV} - y_{TCPV} = 8E-08$	$> Ld = 6E-08 \therefore$	Diferença significativa entre os coeficientes de difusão.