

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Marciana Cocco

**RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS COMPOSTOS COM  
CINZA DE LODO DE ETA E CALCÁRIO MOÍDO**

Santa Maria, RS

2017

**Marciana Cocco**

**RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE  
LODO DE ETA E CALCÁRIO MOÍDO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

Santa Maria, RS  
2017

Cocco, Marciana

Resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de lodo de ETA e calcário moído / Marciana Cocco.- 2017.

147 p.; 30 cm

Orientador: Antônio Luiz Guerra Gastaldini

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2017

1. Resistividade elétrica 2. Cinza de lodo de estação de tratamento de água 3. Calcário moído 4. Risco de corrosão I. Gastaldini, Antônio Luiz Guerra II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Marciana Cocco. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte. E-mail: marcianacocco@outlook.com.

**Marciana Cocco**

**RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE LODO DE ETA E CALCÁRIO MOÍDO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

**Aprovado em 18 de dezembro de 2017:**

---

**Prof. Antônio Luiz Guerra Gastaldini, Dr (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Prof. André Lübeck, Dr (UFSM)**

---

**Prof. Maryangela Geimba de Lima, Dr (ITA)**

Santa Maria, RS  
2017

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Miguel e Neli, e ao meu irmão, Gabriel, que foram meus esteios para chegar ao fim de mais esta etapa.

Ao meu professor orientador, Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini, pela orientação, paciência, confiança e ensinamentos transmitidos desde a graduação.

Aos professores Dr. Sérgio Luiz Jahn e Dr. Lisiane de Marsillac Terra, e aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC).

Aos membros da banca examinadora, professora Dra. Maryangela Geimba de Lima e professor Dr. André Lübeck.

À doutoranda Sabrina, que além de colega de pós graduação foi uma grande companheira nos momentos difíceis e também nos mais alegres durante este período.

Aos voluntários e bolsistas de iniciação científica do Grupo de Pesquisas em Concreto (GEPECON) pela ajuda na fase experimental desta pesquisa.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e ao Centro de Tecnologia pelos recursos financeiros disponibilizados.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) e à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pela estrutura concedida.

Por fim, à MC-Bauchemie e à Votorantin, pela doação dos aditivos e do calcário utilizados nesta pesquisa.

## RESUMO

### RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE LODO DE ETA E CALCÁRIO MOÍDO

AUTOR: Marciana Cocco

ORIENTADOR: Antônio Luiz Guerra Gastaldini

A resistividade elétrica, propriedade do concreto que representa sua resistência à passagem de corrente elétrica, mostra-se importante no que diz respeito à corrosão das armaduras e, portanto, à durabilidade das estruturas de concreto armado. O uso de adições minerais em matrizes de concreto tem se mostrado eficaz tanto para redução do impacto ambiental causado pela produção do cimento e descarte de resíduos quanto para melhorias nas propriedades relacionadas à durabilidade das estruturas. Neste estudo foi investigado o desempenho de concretos com substituição parcial do cimento Portland por cinza de lodo de estação de tratamento de água (CLETA) e calcário moído frente à resistividade elétrica. A definição das misturas seguiu um planejamento estatístico do tipo PRCC, com teores de CLETA variando de 0% a 30%, teores de calcário entre 0% e 15% e limites mínimo e máximo de relação água/aglomerante (a/agl) de 0,35 e 0,65, além de uma mistura de referência, sem adições minerais, com relações a/agl 0,35, 0,50 e 0,65. A avaliação da influência das variáveis da pesquisa sobre a resistividade elétrica, por meio da metodologia de superfície de resposta, ocorreu para os 7, 14, 28, 56 e 91 dias. Evolução da condutividade elétrica e potencial de Hidrogênio (pH) com o tempo também foram analisados, aos 7, 28 e 91 dias. A CLETA, que foi calcinada a 700 °C em uma mufla e moída durante 1h em moinho de bolas, mostrou-se uma adição mineral com alta atividade pozolânica quando em misturas ternárias com cimento Portland e calcário moído. Melhores resultados de resistividade elétrica foram obtidos para teores de calcário em torno de 7,5% desde as idades iniciais. Quanto à CLETA, este teor variou de 0% nas idades iniciais a 30% em idades mais avançadas. O aumento do seu efeito a cada idade de ensaio é um indício de que a CLETA teve influência sobre a microestrutura do concreto. A redução da resistividade elétrica com aumento da relação a/agl foi maior a cada idade, sendo este o fator com maior influência aos 91 dias. Tanto a resistividade elétrica quanto o pH e a condutividade elétrica reduziram com o tempo em todas as misturas. De acordo com os limites indicados pelo CEB 192, risco de corrosão baixo ou desprezível foram alcançados nos traços do planejamento experimental com altos teores de substituição de CLETA e calcário. Além disso, para cada relação a/agl as maiores resistividades elétricas foram aquelas dos traços com elevados teores de CLETA e calcário na proporção 2:1. Substituição do cimento Portland por 15% de CLETA e 7,5% de calcário se mostraram eficientes em reduzir o risco de corrosão tanto para as classes de agressividade ambiental definidas pela NBR 12655 (ABNT, 2015), quanto em igualdade de resistência mecânica com concretos sem adições minerais. Ademais, economia de cimento superior a 100 kg/m<sup>3</sup> foi observada para estes mesmos teores de substituição em relação ao seu traço de referência de mesma resistência à compressão.

Palavras-chave: Resistividade elétrica. Cinza de lodo de estação de tratamento de água. Calcário moído. Risco de corrosão.

## ABSTRACT

### ELECTRICAL RESISTIVITY OF CONCRETE MIXES WITH WTP SLUDGE ASH AND GROUND LIMESTONE

AUTHOR: Marciana Cocco

ADVISOR: Antônio Luiz Guerra Gastaldini

Electrical resistivity, a property of the concrete that represents its resistivity to the passing of electric current, is important in terms of corrosion of reinforced concrete and, therefore, of the durability of the structures of reinforced concrete. The use of mineral additives in concrete matrices has been shown to be effective both in reducing the environmental impact caused by cement production and waste disposal and in improving properties related to the durability of structures. In this study, the performance of concrete with partial replacement of Portland cement by sludge ash from water treatment plant (WTPSA) and ground limestone before electrical resistivity was investigated. The definition of the mixtures followed a statistical design of the CCRD type, with WTPSA levels varying from 0% to 30%, concentrations of limestone between 0% and 15% and minimum and maximum water/binder (w/b) ratios of 0.35 and 0.65, in addition to a reference mix, with no mineral additions, with ratios of 0.35; 0.50 and 0.65. The assessment of the influence of variables in studies on electrical resistivity, through the response surface methodology, was carried out for the 7th, 14th, 28th, 56th and 91st days. The evolution of the electrical conductivity and potential of Hydrogen (pH) over time were also analyzed on the 7th, 28th and 91st days. The WTPSA, which was calcined in a muffle kiln at 700 ° C and ground in a ball mill for 1 h, became a mineral addition with high pozzolanic activity when in ternary mixtures with Portland cement and ground limestone. Better electrical resistivity results were obtained limestone content around 7.5% since the early ages. As for WTPSA, its content ranged from 0% in the early ages to 30% in older ages. The increase in its effect at each test age is an indication that WTPSA had an influence on the concrete microstructure. The reduction of electrical resistivity with increasing w/b ratio was greater at each age, being the factor with the greatest influence after 91 days. In time, both electrical resistivity, pH, and electrical conductivity decreased in all mixtures. According to the limits indicated by the CEB 192, low or negligible corrosion risk was reached with high levels of replacement of WTPSA and limestone in the mixtures. Moreover, for each relation w/b ratio, the greatest electrical resistivities were those of the mixtures with high levels of WTPSA and limestone in the proportion 2:1. Replacement of Portland cement by 15% of WTPSA and 7.5% of limestone proved to be efficient in reducing the risk of corrosion for both the environmental aggression classes defined by the NBR 12655 (ABNT, 2015) and on equal mechanical resistivity with concretes with no mineral additions. Additionally, a cement saving of more than 100 kg/m<sup>3</sup> was observed for these same substitution contents in relation to their mixtures of the same compressive strength value.

Keywords: Electrical resistivity. Water Treatment Plant Sludge Ash. Ground limestone. Risk of corrosion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Valores de resistividade elétrica indicativos do risco de corrosão do concreto, de acordo com o CEB 192 e o boletim europeu COST 509. ....	20
Figura 2 - Pilha ou célula de corrosão eletroquímica no concreto.....	21
Figura 3 - Modelo de Tuutti da sequência de corrosão das armaduras em concreto. ....	24
Figura 4 - Tipos de corrosão e fatores que os provocam. ....	25
Figura 5 - Representação esquemática do processo de carbonatação. ....	26
Figura 6 - Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente.....	26
Figura 7 - Esquema do processo de corrosão por pites autossustentado.....	27
Figura 8 - Formas de ocorrência de íons cloreto na estrutura do concreto.....	28
Figura 9 - Liberação dos cloretos ligados à frente de carbonatação. ....	29
Figura 10 - Curva típica tensão versus deformação. LE: limite de escoamento; X: ponto de ruptura do material na ausência do meio corrosivo; $\oplus$ : ponto de ruptura do material na presença do meio corrosivo. ....	30
Figura 11 - Evolução da condutividade elétrica de pastas de cimento com a idade. ....	32
Figura 12 - Relação entre resistividade elétrica, relação água/cimento e consumo de cimento Portland, ensaiado aos 28 dias.....	32
Figura 13 - Representação esquemática da estrutura do concreto.....	35
Figura 14 - Relação entre porosidade total acessível e resistividade.....	36
Figura 15 - Relação entre penetração de água e resistividade superficial para misturas contendo metacaulim. ....	37
Figura 16 – Aumento da resistividade com o tempo para diferentes tipos de cimento. ....	38
Figura 17 - Relação entre difusividade de cloretos e resistividade elétrica. ....	39
Figura 18 - Método dos quatro eletrodos para medição da resistividade elétrica do concreto.....	42
Figura 19 – Representação da cadeia de processos de uma ETA convencional. ...	49
Figura 20 - Curva termogravimétrica do lodo empregado por Hoppen et al. (2005). ....	52
Figura 21 - Curvas TG e DTG do lodo calcinado a 650 °C utilizado por Batalha e Rocha (2013). ....	52
Figura 22 - Absorção capilar das argamassas com CLETA estudadas por Batalha e Rocha (2014). ....	54
Figura 23 - Conteúdo de Portlandita livre para misturas com EAF (a) e EAF e lodo de ETA queimado (b) do estudo de El-Didamony, Khalil e Heikal (2014) ....	56
Figura 24 - Resistência à compressão das misturas com lodo úmido (a) e lodo calcinado (b) estudadas por Ramirez et al. (2015). ....	57
Figura 25 - Curva granulométrica da areia. ....	62
Figura 26 – Curva granulométrica da brita. ....	63
Figura 27 - Distribuição granulométrica a laser do cimento Portland e das adições minerais.....	65
Figura 28 – Difractogramas de raios-X das amostras de lodo in natura e calcinado. ....	67
Figura 29 - Marcação feita nos corpos de prova para as medições de resistividade elétrica.....	74
Figura 30 – Medições de resistividade elétrica feitas com o equipamento comercial empregado na pesquisa. ....	75
Figura 31 - Agitadores magnéticos para as soluções de cada traço. ....	76
Figura 32 - Ensaio de condutividade elétrica e pH. ....	76

Figura 33 - Equações polinomiais de resistividade elétrica para os traços de referência.	82
Figura 34 - Diagrama de Pareto para a resistividade elétrica aos 7 dias.	84
Figura 35 - Contornos da superfície de resposta da resistividade elétrica aos 7 dias para as relações água/aglomerante 0,35 (a); 0,41 (b); 0,50 (c); 0,59 (d) e 0,65 (e).	84
Figura 36 - Diagrama de Pareto para a resistividade elétrica aos 14 dias.	89
Figura 37 - Contornos da superfície de resposta da resistividade elétrica aos 14 dias para as relações água/aglomerante 0,35 (a); 0,41 (b); 0,50 (c); 0,59 (d) e 0,65 (e).	90
Figura 38 - Diagrama de Pareto para a resistividade elétrica aos 28 dias.	95
Figura 39 - Contornos da superfície de resposta da resistividade elétrica aos 28 dias para as relações água/aglomerante 0,35 (a); 0,41 (b); 0,50 (c); 0,59 (d) e 0,65 (e).	95
Figura 40 - Diagrama de Pareto para a resistividade elétrica aos 56 dias.	100
Figura 41 - Contornos da superfície de resposta da resistividade elétrica aos 56 dias para as relações água/aglomerante 0,35 (a); 0,41 (b); 0,50 (c); 0,59 (d) e 0,65 (e).	101
Figura 42 - Diagrama de Pareto para a resistividade elétrica aos 91 dias.	106
Figura 43 - Contornos da superfície de resposta da resistividade elétrica aos 91 dias para as relações água/aglomerante 0,35 (a); 0,41 (b); 0,50 (c); 0,59 (d) e 0,65 (e).	107
Figura 44 - Evolução da condutividade elétrica com o tempo para as relações a/agl (a) 0,41, (b) 0,50, (c) 0,59, (d) 0,35 e 0,65.	115
Figura 45 - Evolução do pH com o tempo para as relações a/agl (a) 0,41, (b) 0,50, (c) 0,59, (d) 0,35 e 0,65.	118
Figura 46 - Resistividade elétrica versus condutividade elétrica aos 91 dias.	121
Figura 47 - Resistividade elétrica versus concentração de íons OH <sup>-</sup> aos 91 dias.	122
Figura 48 - Concentração de íons OH <sup>-</sup> versus condutividade elétrica aos 91 dias.	122
Figura 49 - Risco de corrosão para os traços com relação a/agl 0,41.	123
Figura 50 - Risco de corrosão para os traços com relação a/agl 0,50.	124
Figura 51 - Risco de corrosão para os traços com relação a/agl 0,59.	125
Figura 52 - Risco de corrosão para os traços com relação a/agl 0,35 e 0,65.	125
Figura 53 - Resistividade elétrica aos 28 dias para as relações a/agl máximas das classes de agressividade ambiental estabelecidas pela NBR 12655 (ABNT, 2015).	127
Figura 54 - Resistividade elétrica aos 91 dias para as relações a/agl máximas das classes de agressividade ambiental estabelecidas pela NBR 12655 (ABNT, 2015).	128

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos lodos estudados pelos autores. ....	50
Tabela 2 - Características físicas dos agregados. ....	62
Tabela 3 - Características físicas do cimento Portland e das adições minerais. ....	65
Tabela 4 - Caracterização mecânica do cimento conforme NBR 5733 (ABNT, 1991) .....	66
Tabela 5 - Composição química do cimento Portland, do calcário, e do lodo calcinado e in natura. ....	66
Tabela 6 – Caracterização por análises termodiferencial e termogravimétrica do lodo calcinado. ....	68
Tabela 7 - Traços unitários empregados na dosagem dos concretos de referência. ....	69
Tabela 8 - Traços do planejamento experimental e de referência. ....	70
Tabela 9 - Consumo de materiais por m <sup>3</sup> de concreto. ....	71
Tabela 10 – Resistividade elétrica aparente corrigida dos traços do planejamento experimental. ....	81
Tabela 11 - Análise de variância (ANOVA) e coeficiente de determinação (R <sup>2</sup> ) para resistividade elétrica aos 7 dias. ....	83
Tabela 12 - Valores médios corrigidos de resistividade elétrica aparente ( $\rho_{\text{corrigidos}}$ ) e índices de resistividade elétrica ( $I_{\rho}$ ) aos 7 dias. ....	87
Tabela 13 - Análise de variância (ANOVA) e coeficiente de determinação (R <sup>2</sup> ) para resistividade elétrica aos 14 dias. ....	89
Tabela 14 - Valores médios corrigidos de resistividade elétrica aparente ( $\rho_{\text{corrigidos}}$ ) e índices de resistividade elétrica ( $I_{\rho}$ ) aos 14 dias. ....	93
Tabela 15 - Análise de variância (ANOVA) e coeficiente de determinação (R <sup>2</sup> ) para resistividade elétrica aos 28 dias. ....	94
Tabela 16 - Valores médios corrigidos de resistividade elétrica aparente ( $\rho_{\text{corrigidos}}$ ) e índices de resistividade elétrica ( $I_{\rho}$ ) aos 28 dias. ....	98
Tabela 17 - Análise de variância (ANOVA) e coeficiente de determinação (R <sup>2</sup> ) para resistividade elétrica aos 56 dias. ....	100
Tabela 18 - Valores médios corrigidos de resistividade elétrica aparente ( $\rho_{\text{corrigidos}}$ ) e índices de resistividade elétrica ( $I_{\rho}$ ) aos 56 dias. ....	104
Tabela 19 - Análise de variância (ANOVA) e coeficiente de determinação (R <sup>2</sup> ) para resistividade elétrica aos 91 dias. ....	106
Tabela 20 - Valores médios corrigidos de resistividade elétrica aparente ( $\rho_{\text{corrigidos}}$ ) e índices de resistividade elétrica ( $I_{\rho}$ ) aos 91 dias. ....	110
Tabela 21 - Coeficientes de regressão (linear e quadráticos) e $p_{\text{valores}}$ para cada idade. .....	111
Tabela 22 – Condutividade elétrica aos 7, 28 e 91 dias. ....	115
Tabela 23 - Potencial de Hidrogênio (pH) aos 7, 28 e 91 dias. ....	118
Tabela 24 – Dados experimentais de resistência mecânica ( $f_{c28}$ ), resistividade elétrica ( $\rho_{28}$ e $\rho_{91}$ ) e consumo de materiais. ....	129
Tabela 25 – Equações da curva de Abrams e valores de R <sup>2</sup> para resistência mecânica ( $f_{c28}$ ) e resistividade elétrica ( $\rho_{28}$ e $\rho_{91}$ ). ....	130
Tabela 26 – Equações da curva de Abrams e valores de R <sup>2</sup> para o consumo de materiais (C). ....	130

Tabela 27 - Relações água/aglomerante, resistividade elétrica ( $\rho_{28}$ ) e consumo de materiais (em $\text{kg/m}^3$ ) de acordo com classes de resistência mecânica aos 28 dias ( $f_{c28}$ ). .....	130
Tabela 28 - Acréscimo de resistividade elétrica e economia de cimento e aos 28 dias com substituição de cimento por 15% de CLETA e 7,5% de calcário. ....	131
Tabela 29 - Resistividade elétrica ( $\rho_{91}$ ) e risco de corrosão aos 91 dias para as relações a/agl calculadas aos 28 dias. ....	131
Tabela 30 - Resistência mecânica dos traços do planejamento experimental. ....	147

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 .....	18
Equação 2 .....	42
Equação 3 .....	42
Equação 4 .....	43
Equação 5 .....	43
Equação 6 .....	72
Equação 7 .....	112
Equação 8 .....	112
Equação 9 .....	112
Equação 10 .....	112
Equação 11 .....	112

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
<b>2</b>	<b>RESISTIVIDADE E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO</b>	<b>18</b>
2.1	Corrosão das armaduras no concreto	20
2.1.1	Iniciação	23
2.1.2	Propagação	30
2.2	Fatores que influenciam a resistividade elétrica do concreto	31
2.2.1	Relação água/aglomerante e consumo de cimento	31
2.2.2	Grau de hidratação, tempo e regime de cura	33
2.2.3	Grau de saturação dos poros (teor de umidade)	33
2.2.4	Porosidade e permeabilidade	34
2.2.5	Tipo de cimento e adições minerais	37
2.2.6	Agregados	40
2.2.7	Temperatura do meio, presença de íons agressivos e natureza da corrente	40
2.3	Medição de resistividade elétrica	41
<b>3</b>	<b>CLETA COMO ADIÇÃO MINERAL NO CONCRETO</b>	<b>45</b>
3.1	Argila calcinada e calcário moído como adições minerais	45
3.2	Estudos prévios com a CLETA como adição mineral	49
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>60</b>
4.1.1	Variáveis da pesquisa	60
4.2	Caracterização dos materiais	61
4.2.1	Agregados	61
4.2.2	Cimento Portland e adições minerais	63
4.2.3	Aditivos	68
4.2.4	Água	68
4.3	Dosagem dos concretos	69
4.4	Dosagem das pastas	71
4.5	Moldagem e cura dos corpos de prova	72
4.6	Investigação experimental	73
4.6.1	Resistividade elétrica aparente	73
4.6.2	Condutividade elétrica e potencial de Hidrogênio (pH)	75
4.6.3	Resistência à compressão axial	77
4.7	Tratamento dos resultados	77
<b>5</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>80</b>
5.1	Resistividade elétrica versus tempo	80
5.1.1	Influência das variáveis da pesquisa na resistividade elétrica em cada idade	82
5.1.2	Condutividade elétrica, potencial de Hidrogênio (pH) e concentração de íons OH-	114
5.2	Avaliação do risco de corrosão	123
5.2.1	Traços do planejamento experimental	123
5.2.2	Traços relacionados às classes de agressividade ambiental da NBR 12655 (ABNT, 2015)	126

5.2.3 Traços de acordo com classes de resistência mecânica.....	128
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>133</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>136</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>147</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil está intimamente associada ao desenvolvimento econômico de um país, mas tem também relação com o elevado consumo de recursos naturais e o conseqüente descarte de resíduos que causam significativos impactos ambientais. O material mais empregado na indústria da construção civil é o concreto, perdendo somente para a água na lista dos materiais mais consumidos no mundo.

Conforme a NBR 12655 (ABNT, 2015), o concreto é o resultado da mistura homogênea de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, e sua produção demanda elevado consumo de materiais. A fabricação do cimento, se considerada isoladamente, também consome elevada quantidade de matérias primas, sendo que os impactos ambientais gerados pela sua produção englobam também elevado consumo de energia e liberação de CO<sub>2</sub>.

A produção de uma tonelada de clínquer pode gerar entre 0,66 e 0,88 toneladas de CO<sub>2</sub> (GAO; ZHOU; ZHAO, 2011; GARTNER, 2004; MARQUES; CHASTRE; NUNES, 2013; XU; JU; GE, 2013). No Brasil, embora esse valor fique em torno de 0,6 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzido (CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE, 2011), a fabricação de cimento durante o ano de 2016 foi superior a 54,7 milhões de toneladas (SINC, 2016), o que resultou em elevada liberação total de CO<sub>2</sub>. Normalmente a opção empregada por indústrias modernas para a redução das emissões de gases poluentes tem sido a substituição de parte do clínquer Portland por materiais cimentícios suplementares.

Steenberg et al. (2011) observaram que, tomando a resistência à compressão como base para o cálculo do consumo de CO<sub>2</sub> por MPa para diferentes cimentos compostos em relação ao cimento Portland comum, misturas de metacaulim e calcário chegaram a alcançar reduções de emissão de CO<sub>2</sub> de até 30% para o mesmo desempenho que o cimento de referência. Além disso, segundo resultados obtidos por meio de um estudo de caso feito por Isaia e Gastaldini (2004), ganhos ambientais, técnicos e econômicos puderam ser obtidos com substituição parcial de cimento por adições minerais. Um traço de mistura com 70% de escória de alto forno e 20% de cinza volante apresentou o melhor desempenho, com reduções de 5% no custo de produção, 50% no consumo de energia e 81% na emissão de CO<sub>2</sub> em relação ao concreto de cimento Portland. Além disso, os autores observaram aumento de 34% no índice de durabilidade quando comparado ao concreto sem as adições minerais.

Dessa maneira, o uso de adições minerais vem ao encontro não só da necessidade de redução do impacto ambiental causado pela fabricação do cimento Portland, mas também da melhoria das propriedades do concreto, especialmente aquelas relacionadas à durabilidade das estruturas. Elas afetam, por exemplo, a composição da solução aquosa dos poros, interferindo na condutividade elétrica do concreto (GASTALDINI et al., 2014; ROSA, 2005; TOPÇU; UYGUNOGLU; HOCAOGLU, 2012). Além disso, elas proporcionam normalmente maior refinamento dos poros (ANDRÉS et al., 2015; BATALHA; ROCHA, 2014), o que reduz a permeabilidade e, mesmo que às vezes lentamente, aumenta a resistência do concreto.

Hossain et al. (2016) constatou que extensas pesquisas já foram desenvolvidas com materiais pozolânicos como substituição parcial do cimento, como escória de alto forno (EAF), cinza volante (CV), metacaulim (MK), cinza de casca de arroz (CCA), entre outros, afim de melhorar as propriedades de durabilidade de concretos e argamassas. Alguns deles relatam que concretos contendo substituição de cimento Portland em diversos teores por pozolana podem apresentar propriedades de durabilidade superior àqueles sem substituição, inclusive em relação ao risco e à resistência à corrosão. Além disso, a percepção de que as estruturas de concreto armado vêm sofrendo com patologias cada vez mais cedo (necessitando de manutenções preventivas e corretivas frequentes e precoces) serve de estímulo para o desenvolvimento de pesquisas que investiguem potencialidades de novas adições minerais (e inclusive combinações destas).

Alguns materiais, como o lodo de estação de tratamento de água (ETA), ainda foram pouco estudados. O lodo de ETA, resíduo do processo de transformação de água bruta em água potável nas estações de tratamento de água, é classificado como resíduo sólido pertencente a Classe II A (resíduos não inertes) de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), não podendo ser lançado na rede pública de esgoto nem em corpos d'água. Além disso, a presença de coagulantes e outros produtos químicos aplicados durante o tratamento da água, como o sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$ ), podem provocar aumento de sedimentação dos sólidos, gerando depósitos indesejáveis em corpos d'água. O envio do lodo para aterros sanitários tem sido uma prática corrente por empresas de saneamento, que arcam com os custos deste descarte.

Alguns pesquisadores estudaram o lodo de ETA para fabricação de tijolos (HEGAZY; FOUAD; HASSANAIN, 2012), substituição parcial da matéria-prima silicosa na produção do clínquer (CHEN; MA; DAI, 2010) e substituição de agregado miúdo em matrizes de concreto (HOPPEN et al., 2005). Algumas investigações analisaram as características que o lodo apresenta após passar por tratamento térmico e alguns efeitos provocados na estrutura das misturas (BATALHA; ROCHA, 2013, 2014; RAMIREZ et al., 2015).

Este trabalho faz parte de uma pesquisa mais ampla que estuda o lodo de ETA e é desenvolvida no Grupo de Pesquisas em Concreto (GEPECON), pertencente ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). As características do lodo da ETA de Venâncio Aires, RS, foram estudadas por Hengen (2014), que avaliou também a resistência à compressão de concretos com adição da cinza deste lodo. A cinza deste mesmo lodo de ETA foi empregada para avaliação das características de hidratação e microestrutura de pastas por Stein (2016), da retração total e penetração de cloretos em concretos por Antolini (2015), e desempenho, frente à carbonatação, por Adorna (2016).

Bons resultados foram observados na avaliação das propriedades de concretos com substituição parcial do cimento Portland por cinza de lodo de ETA (CLETA). Todavia, pesquisas sugerem efeito sinérgico entre materiais argilosos (como argila calcinada e metacaulim) e calcário moído quando usados em misturas ternárias com o cimento Portland (ANDRÉS et al., 2015; ANTONI et al., 2012; STEENBERG et al., 2011).

Nesse contexto, este trabalho pretende contribuir com os estudos referentes à durabilidade das estruturas de concreto armado por meio do estudo da resistividade elétrica de concretos com a incorporação de cinza de lodo de ETA e calcário moído como adições minerais.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo geral avaliar a influência da substituição parcial de cimento por cinza de lodo de estação de tratamento de água (CLETA) e calcário moído sobre propriedades relacionadas à durabilidade do concreto, em especial sua resistividade elétrica aparente.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Investigar a influência do teor das adições minerais e da relação água/aglomerante sobre a resistividade elétrica aparente com o aumento da idade;
- Observar qual o efeito de cada variável sobre a resistividade elétrica nas idades de ensaio;
- Analisar a influência do teor das adições minerais e da relação água/aglomerante sobre a condutividade elétrica e o potencial de Hidrogênio (pH) da solução aquosa dos poros com o aumento da idade;
- Avaliar o risco de corrosão de acordo com o CEB 192:
  - Dos traços do planejamento experimental;
  - Em relação às classes de agressividade ambiental da NBR 12655 (ABNT, 2015);
  - Para patamares de resistência à compressão axial especificados (30MPa, 40MPa, 50MPa, 60MPa e 70MPa)

## 2 RESISTIVIDADE E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

A resistividade elétrica ( $\rho$ ) é uma propriedade do concreto e representa sua resistência à passagem de corrente elétrica. Por ser uma característica inerente do material, a resistividade é obtida a partir da resistência ( $R$ ) do concreto, conforme a Equação 1.

$$\rho = k.R \quad (1)$$

O fator  $k$  é geométrico e depende tanto do tamanho e forma da amostra quanto da distância entre as sondas no dispositivo de ensaio (LAYSSI et al., 2015). A resistividade elétrica normalmente é expressa em  $\Omega\text{m}$  (ohm metro) sendo que, no concreto, sua variação pode ser bastante elevada, indo de  $10^6 \Omega\text{m}$  para amostras secas em estufas a  $10 \Omega\text{m}$  para concretos saturados (Whiting e Nagi, 2003 apud HORNBOSTEL; LARSEN; GEIKER, 2013). Em algumas situações pode ser preferível a análise da condutividade elétrica ( $\sigma$ ) do concreto, em vez da resistividade elétrica, sendo a primeira o inverso da segunda. A unidade da condutividade elétrica é o S/m (Siemens por metro), ou então  $1/\Omega\text{m}$ .

Segundo Abreu (1998) duas regiões características podem ser identificadas em um elemento de concreto, as quais possuem valores de resistividade distintos. A região superficial que está sujeita a ciclos de molhagem e secagem possui um valor de resistividade, denominada resistividade elétrica aparente (REA). A outra região é mais interna, onde a umidade permanece mais estável e sua resistividade é denominada volumétrica (REV). Normalmente as medidas de resistividade são feitas por meio de eletrodos embutidos ou encostados na superfície do concreto. Desta forma, a resistividade que está sendo medida é a REA.

As diversas técnicas de medição de resistividade elétrica buscam normalmente quantificar as propriedades condutoras da microestrutura do concreto, sendo que as medições de resistividade podem ser empregadas para avaliar as características dos poros, como tamanho e extensão de sua conectividade (LAYSSI et al., 2015). Além disso, esta propriedade está intimamente ligada à permeabilidade dos fluidos e à difusividade de íons através dos poros do concreto (RIBEIRO; CUNHA, 2014a). De acordo com os resultados obtidos por Zaccardi e Di Maio (2014), a descrição da

microestrutura do concreto por meio da resistividade elétrica por ser melhorada com simultânea avaliação da condutividade elétrica do líquido dos poros. Deste modo, tanto a resistividade elétrica quanto a condutividade elétrica estão intimamente ligadas ao processo de corrosão das armaduras, sendo fundamentais no monitoramento das estruturas de concreto armado.

Dentre os vários métodos existentes para medir as taxas de corrosão, o método da resistência de polarização linear (RPL) é o mais comumente utilizado, com variações no arranjo da configuração de medição, sendo este um método não destrutivo. A partir de um contra eletrodo uma corrente é injetada e a quantidade necessária para atingir uma variação determinada de potencial é medida através de um eletrodo de referência. A partir dessa medição, a resistência de polarização ( $R_p$ ) instantânea pode ser calculada com base na corrente de corrosão total ( $I_{corr}$ ) pela equação de Stern e Geary (1957)<sup>1</sup>. A razão entre  $I_{corr}$  e a área corroída é a taxa de corrosão<sup>2</sup> ( $i_{corr}$ ) (HORNBOSTEL; LARSEN; GEIKER, 2013).

Alonso, Andrade e González (1988) já sugeriam que a resistividade elétrica do concreto pode ser um fator controlador da taxa de corrosão. Conforme Hornbostel, Larsen e Geiker (2013) a relação entre a resistividade do concreto e a taxa de corrosão das armaduras permitem a avaliação do estágio de corrosão de maneira eficiente e com custo razoavelmente baixo. Os limites de resistividade relacionados ao risco de corrosão que são apresentados por alguns autores, no entanto, apresentam divergências. Uma comparação é apresentada por Ribeiro e Cunha (2014a) e consta na Figura 1.

Embora os intervalos para avaliação do risco de corrosão das armaduras de uma estrutura de concreto apresentem divergências, a medição desta grandeza pode ser um forte indicativo da velocidade de corrosão do aço embutido no concreto. Os íons que fluem pela solução dos poros do concreto são resultado de reações eletroquímicas, sendo que a maior ou menor mobilidade desses pelo concreto, principalmente no de cobertura, será um indício da velocidade com que o aço está sendo corroído. Desta forma, a medida desse fluxo de elétrons é uma boa maneira de medir a taxa de corrosão. As características do concreto de cobertura terão,

---

<sup>1</sup>  $I_{corr} = (\Delta I / \Delta E) \times B = B / R_p$ , onde  $I$  é a corrente injetada,  $E$  é o potencial medido,  $B$  é uma constante que vale 26 mV para corrosão ativa e 52 mV para corrosão passiva, e  $R_p$  é a resistência de polarização (ALONSO; ANDRADE; GONZÁLEZ, 1988, p. 690)

<sup>2</sup> A taxa de corrosão é frequentemente descrita como densidade de corrente  $i_{corr}$  (mA/cm<sup>2</sup>) (HORNBOSTEL; LARSEN; GEIKER, 2013, p. 61)

portanto, grande importância sobre o fenômeno da corrosão do aço (HELENE, 1993; MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011; SENGUL, 2014).

Figura 1 - Valores de resistividade elétrica indicativos do risco de corrosão do concreto, de acordo com o CEB 192 e o boletim europeu COST 509.

Resistividade elétrica ( $\Omega.m$ )		Risco de corrosão
CEB 192	COST 509	
> 200	> 1000	Desprezível
100 a 200	500 a 1000	Baixo
-	100 a 500	Moderado
50 a 100	< 100	Alto
< 50	-	Muito alto

Fonte: Adaptado de Ribeiro e Cunha (2014a, p. 182)

## 2.1 CORROSÃO DAS ARMADURAS NO CONCRETO

O processo de corrosão do aço embutido no concreto é um processo complexo e ocorre segundo vários fatores que agem simultaneamente sobre a armadura, sendo que a corrosão pode ser definida como a deterioração de um material pela sua interação com o meio ambiente, seja por ação química ou eletroquímica, associada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 2011; HELENE, 1993; RIBEIRO; CUNHA, 2014b).

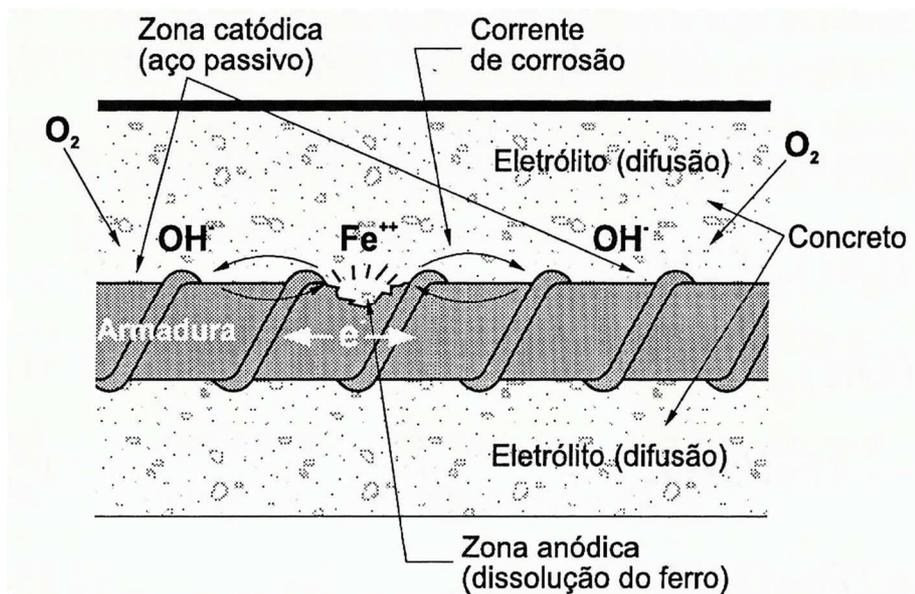
A grande maioria dos metais são encontrados na natureza sob forma de compostos, como os óxidos e sulfetos metálicos (GENTIL, 2011). Por este motivo, aplicação de energia é necessária para extrair o metal a partir dos minérios ou de outros compostos. Ao contrário do que ocorre nos estados combinados, no estado metálico, as energias dos metais são maiores. Eles são, portanto, menos estáveis. Sua tendência é reagir espontaneamente com os líquidos e gases do local onde forem inseridos, tendendo a retornar ao seu estado natural de minério. Desta forma, o produto da corrosão de um metal geralmente é semelhante ao minério que lhe deu origem no processo de metalurgia (GENTIL, 2011; RIBEIRO; CUNHA, 2014b).

As armaduras embutidas no concreto estão sujeitas a dois principais processos de corrosão: oxidação e corrosão eletroquímica, (HELENE, 1993; RIBEIRO; CUNHA, 2014b). O primeiro processo, também conhecido como corrosão química, é

caracterizado por uma reação gás-metal, que não provoca deterioração significativa na superfície metálica e tem como resultado a formação de uma película de óxido (RIBEIRO; CUNHA, 2014b). O segundo tipo de corrosão da armadura no concreto é de natureza eletroquímica em meio aquoso. Fatores como diferenças de temperatura e umidade, diferença de concentração de íons de agentes agressivos e variação na concentração de oxigênio dissolvido nos poros, entre outros, causam heterogeneidades no concreto (GENTIL, 2011). Entre essas áreas, surge uma diferença de potencial, que pode gerar movimentação de partículas com carga elétrica num eletrólito condutor, o que implica a formação de uma pilha eletroquímica (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011).

Segundo Gentil (2011) uma pilha eletroquímica apresenta 4 componentes básicos: o ânodo, o eletrólito, o cátodo e o circuito metálico, além de uma diferença de potencial entre os eletrodos. A Figura 2 representa o fenômeno de formação de pilha eletroquímica no concreto esquematizado por Cascudo (1997):

Figura 2 - Pilha ou célula de corrosão eletroquímica no concreto.



Fonte: Cascudo (1997).

O ânodo é a parte que sofre oxidação, quando o metal passa do estado metálico para o estado iônico; o cátodo, que sofre redução, é a parte em que são consumidos os elétrons provenientes da região anódica; o circuito metálico, – ligação metálica entre o ânodo e o cátodo, por onde se movem os elétrons da região anódica

para a região catódica –, pode ser caracterizado pelo próprio material metálico; a diferença de potencial se desenvolve entre cátodo e ânodo, sendo este último o potencial mais eletronegativo; e o eletrólito, que funciona como uma ligação externa por onde circulam os íons liberados pelas reações de oxidação ocorridas no ânodo em direção ao cátodo (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011; GENTIL, 2011).

A existência do eletrólito é fundamental para que esse processo de corrosão ocorra. Maior ou menor presença de eletrólito nos poros de concreto tem influência na velocidade de corrosão, sendo que a presença de pouco eletrólito aumenta a resistividade do sistema. Além disso, a presença de oxigênio é fundamental. Ele acessa o concreto por meio de difusão na água dos poros e controla o processo eletroquímico, pois é consumido nas reações de redução na região catódica. A existência de menor disponibilidade de oxigênio no eletrólito provoca redução na velocidade de corrosão, pois os elétrons produzidos na região anódica são consumidos mais lentamente pela região catódica (CASCUDO, 1997; FIGUEIREDO; MEIRA, 2011). Além desses fatores, a absorção de agentes agressivos pelo concreto pode acelerar o processo de corrosão, já que eles aumentam de maneira significativa a condutividade elétrica do eletrólito. Os íons sulfetos ( $S^{2-}$ ), cloreto ( $Cl^-$ ) e nitritos ( $NO_3^-$ ), óxidos de enxofre ( $SO_2$  e  $SO_3$ ), gás carbônico ( $CO_2$ ), entre outros, são alguns dos agentes agressivos que podem estar contidos no eletrólito (CASCUDO, 1997).

O concreto, no entanto, oferece dupla proteção à armadura: química e física.

A proteção química que o concreto exerce sobre a armadura deve-se à formação de uma capa ou película protetora que a envolve, de caráter passivo. Essa película começa a se formar logo após o início da hidratação do cimento e é composta por  $\gamma-Fe_2O_3$  (NEVILLE, 1997). Sua formação é garantida pela basicidade do meio, com pH em torno de 12,5. De acordo com Isaia (1995), investigações feitas por Longuet et al (1973) indicavam que o elevado pH é determinado inicialmente pela presença do hidróxido de sódio e de potássio e, em segundo, lugar pelo hidróxido de cálcio, que é produto da hidratação do cimento. A película protetora impede o acesso de umidade, oxigênio e agentes agressivos à superfície do aço, sendo dependente da manutenção do pH e de um adequado potencial eletroquímico. A alteração desses fatores pode levar à perda de estabilidade da camada passivadora, o que encaminha o ferro ao processo de corrosão (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011).

A separação física do aço do contato direto com o meio externo se dá por uma camada de concreto densa, compactada e com revestimento adequado da armadura,

impedindo o acesso de oxigênio e água, elementos essenciais para a corrosão do aço (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011; GENTIL, 2011). As NBR's 6118 (ABNT, 2014) e 12655 (ANBT, 2015) definem questões como a relação água/cimento ( $a/c$ ), consumo de cimento e espessura do cobrimento da armadura de acordo com a classe de agressividade ambiental, variando com a exposição da estrutura. Concretos com espessura de cobrimento insuficientes ou de má qualidade facilitam os mecanismos de transporte de substâncias deletérias que desencadeiam o processo de corrosão. Por isso, o processo de corrosão deve ser estudado levando em consideração não somente os fatores que agem sobre o aço, mas também aqueles que agredem a massa de concreto, além das características deste, como permeabilidade, porosidade e resistividade elétrica (GENTIL, 2011).

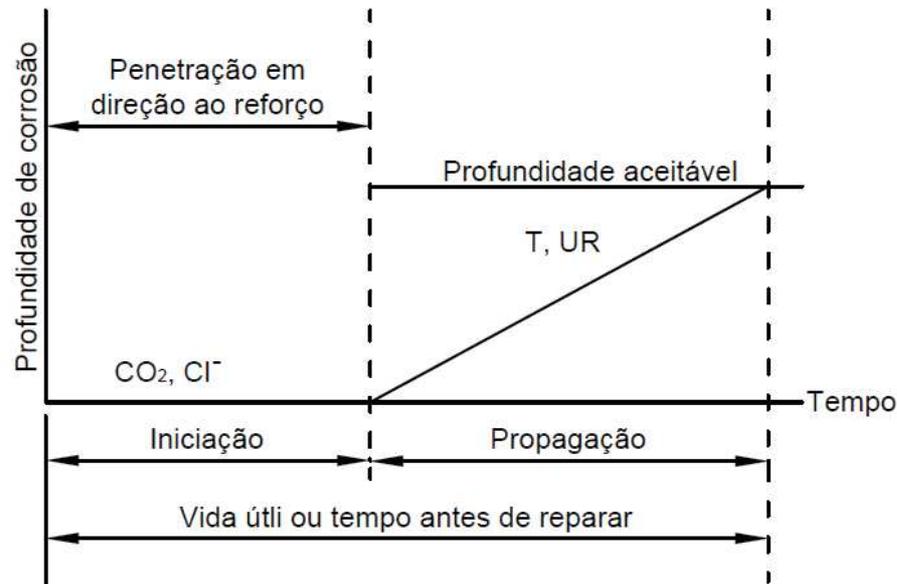
A durabilidade de uma estrutura de concreto armado está relacionada com sua vida útil, correspondendo ao período de tempo durante o qual essa mantém sua capacidade de cumprir a função para a qual foi projetada sem necessidade de intervenções significativas, ocorrendo manutenções preventivas, e não corretivas (HELENE, 1993; ABNT NBR 6118, 2014). Igualmente, esse período corresponde ao tempo até que a frente de carbonatação ou de cloretos chegue até a armadura, despassivando a camada de proteção (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011)

O modelo de vida útil proposto por Tuutti (1982) apresenta dois períodos: a fase de iniciação e a fase de propagação da corrosão (Figura 3).

### **2.1.1 Iniciação**

Durante a fase inicial da corrosão, há uma redução da estabilidade do sistema constituído pela armadura embutida no concreto (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014). Essa condição favorece a penetração de íons agressivos pela camada de concreto e sua chegada até a armadura, o que provoca sua despassivação (TUUTTI, 1982). A classe de agressividade do meio em que a estrutura está exposta, o tipo de cimento e aço utilizados, bem como a porosidade superficial e as fissuras existentes no concreto são alguns fatores que determinam quão longo será esse período de iniciação (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011; RIBEIRO; CUNHA, 2014b)

Figura 3 - Modelo de Tuutti da sequência de corrosão das armaduras em concreto.

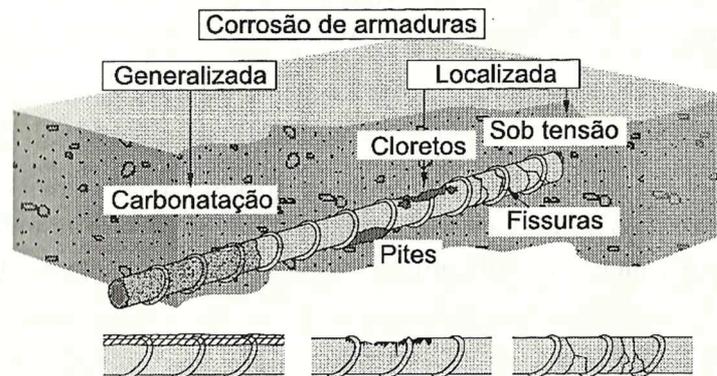


Fonte: Adaptado de Tuutti (1982, p. 18)

A perda da passividade natural da armadura geralmente ocorre de duas formas principais: pela presença de íons cloreto e pela redução da alcalinidade do concreto. Cada uma delas desencadeia um processo diferente de corrosão, podendo ser generalizada (para o caso de carbonatação) ou localizada, por pites (quando a armadura sofre ataque de íons cloreto) ou sob tensão fraturante (quando além dos agentes agressivos, ainda há ação de tensão residual ou aplicada sobre a armadura) (CASCUDO, 1997; GENTIL, 2011). Esses tipos de corrosão estão representados na Figura 4.

A corrosão por carbonatação ocorre em uma grande superfície do metal, sendo que as áreas catódicas e anódicas ocorrem muito próximas umas das outras. Esse mecanismo é chamado de microcélula. A corrosão provocada por cloretos, no entanto, ocorre em zonas pontuais da superfície do aço, formando pites. Neste tipo de corrosão, a zona anódica é muito menor em relação à catódica, e estas são separadas no espaço, o que cria uma macrocélula (HORNBOSTEL; LARSEN; GEIKER, 2013).

Figura 4 - Tipos de corrosão e fatores que os provocam.



Fonte: Cascudo (1997, p. 19)

#### 2.1.1.1 Corrosão generalizada (por carbonatação)

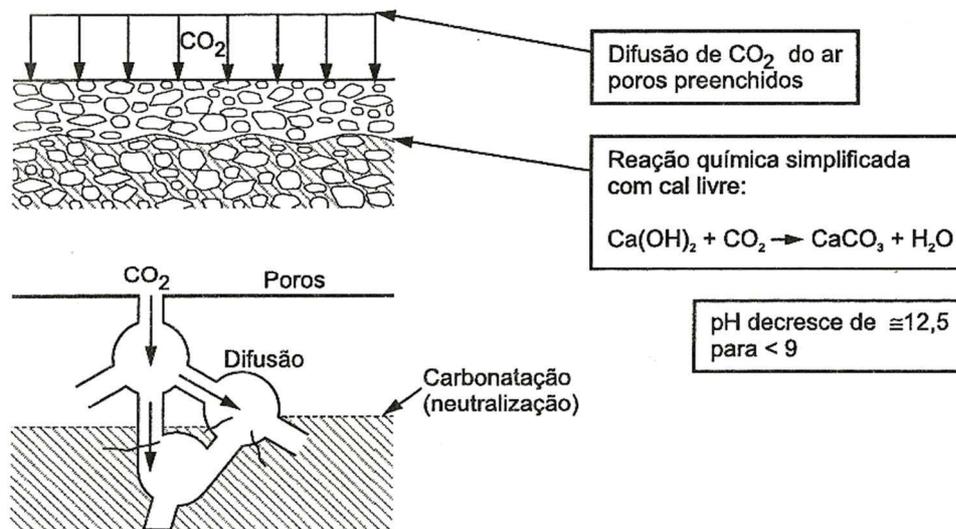
A hidratação dos compostos anidros do cimento proporciona ao concreto, logo nos primeiros momentos de hidratação, um pH alcalino no líquido intersticial. Quando há umidade, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que está presente na atmosfera penetra no concreto pelos poros e ocorre uma reação de oxidação com a portlandita,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014; GENTIL, 2011). Esse processo tem como consequência a redução do pH do concreto a valores próximos a 8,0 (TUUTTI, 1982), que tende a comprometer a película passiva que protege o metal. Este processo está esquematizado na Figura 5.

Kirchheim, Rheinheimer e Dal Molin (2015) fizeram um estudo comparativo de desempenho entre o cimento Portland branco e o cimento Portland comum em relação à carbonatação. As amostras ficaram submetidas à carbonatação acelerada ( $\text{UR } 70 \pm 2$  %, temperatura de  $25 \pm 1$  °C e 100% de  $\text{CO}_2$ ). Análises químicas e físicas realizadas indicaram que o processo de fabricação e a composição química do cimento exerceram grande influência na carbonatação e, conseqüentemente, na durabilidade do concreto. Ademais, a carbonatação foi mais influenciada pela estrutura dos poros do que pela porosidade.

De acordo com Figueiredo e Meira (2011), a umidade da rede dos poros da matriz do concreto tem grande influência na velocidade de carbonatação e é reflexo da umidade do ambiente que está inserido. O grau de carbonatação do concreto em função da umidade relativa do ambiente é mostrado na Figura 6, notando-se um alto grau de carbonatação para umidades relativas entre 50% e 70%. Isso se deve ao fato

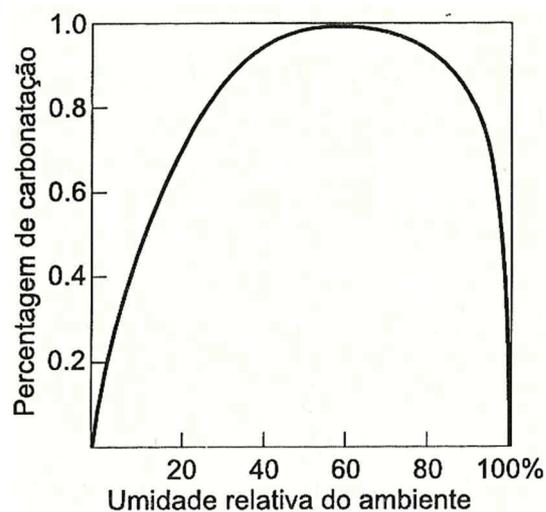
de que, se os poros estiverem secos, há penetração do  $\text{CO}_2$ , mas as reações não ocorrem na ausência de água. Ao contrário, se os poros estiverem saturados, o  $\text{CO}_2$  encontra dificuldade para entrar no concreto, já que a difusividade dos gases é  $10^4$  a  $10^6$  vezes menor na água que no ar (NEVILLE, 1997). Dessa forma, o avanço da frente de carbonatação tem mais chance de ocorrer quando os poros estiverem parcialmente preenchidos de água.

Figura 5 - Representação esquemática do processo de carbonatação.



Fonte: Cascudo e Carasek (2011, p. 866)

Figura 6 - Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente.

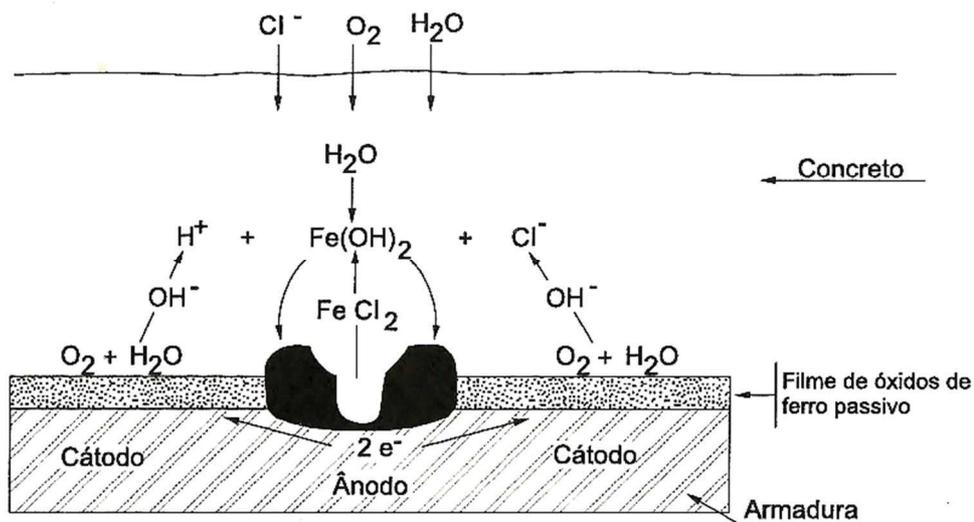


Fonte: Cascudo (1997)

### 2.1.1.2 Corrosão localizada (por cloretos ou sob tensão)

Quando quantidades suficientes de íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) penetram a camada de concreto, juntamente com a água e o oxigênio, eles desestabilizam e destroem a camada passivadora de forma localizada, chamada corrosão por pite. Esses íons ativam a superfície do aço e formam o ânodo, sendo que a parte que continua passivada passa a ser o cátodo (NEVILLE, 1997; RIBEIRO; CUNHA, 2014b). Este processo, ilustrado na Figura 7, ocorre de maneira dinâmica com eventos de despassivação e repassivação ocorrendo repetitivamente até a despassivação definitiva da armadura.

Figura 7 - Esquema do processo de corrosão por pites autossustentado.



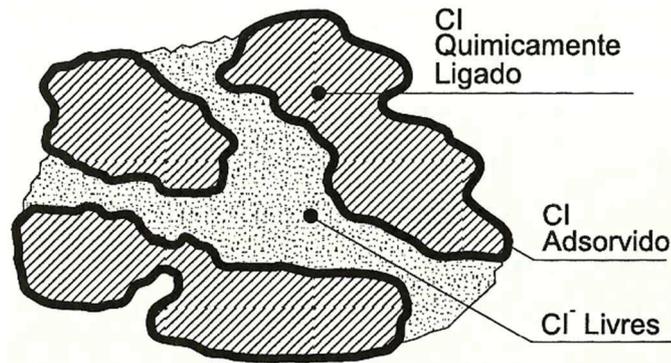
Fonte: Cascudo (1997)

Um dos fatores que determina a penetração de íons livres no concreto é o teor de umidade. Isso porque, dependendo do teor de umidade, o transporte de cloretos pode ocorrer por absorção capilar (teores de umidade menores) ou por difusão (umidades próximas a saturação). Em concretos secos não há água suficiente para transportar os íons  $\text{Cl}^-$  até a armadura e a tendência é o processo corrosivo não ocorrer, mesmo com concentrações muito elevadas de cloretos (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011; RIBEIRO; CUNHA, 2014b),

O cloreto pode estar presente no concreto sob três formas distintas (RIBEIRO; CUNHA, 2014b), conforme ilustrado na Figura 8. Ele pode se apresentar na forma de

cloroaluminato de cálcio ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), conhecido por Sal de Friedel e, neste caso, está quimicamente combinado com o  $\text{C}_3\text{A}$ ; adsorvido na superfície dos poros; ou então livres, na forma de íons  $\text{Cl}^-$ .

Figura 8 - Formas de ocorrência de íons cloreto na estrutura do concreto.



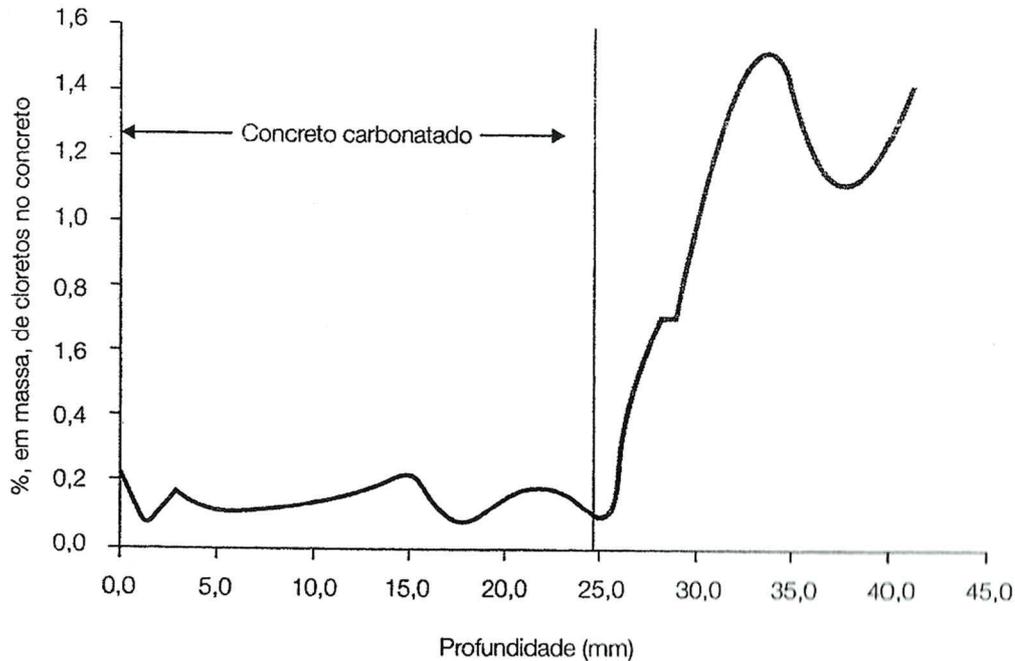
Fonte: Cascudo (1997)

O emprego de cimento com elevado teor de  $\text{C}_3\text{A}$  aumenta a capacidade de combinação dos íons cloreto na formação do cloroaluminato de cálcio, o que reduz a quantidade dos íons livres na solução dos poros (FIGUEIREDO, 2011; NEVILLE, 1997). Em estudo feito por Gastaldini et al. (2014), a quantidade de íons cloreto quimicamente combinados foi reduzido com a substituição parcial de cimento por CCA em decorrência da redução do teor de aluminato. Neste estudo, somado a menor quantidade de íons cloretos combinados quimicamente, o efeito de fissuras maiores decorrentes da retração das amostras resultou em maiores profundidades de penetração de cloreto para um mesmo período de tempo.

A presença de cloretos próximo a armadura, por si só, não representa o início do processo corrosivo. Para que este seja desencadeado, é preciso que haja uma quantidade mínima de cloretos, conhecida por limite crítico de cloretos (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011). Fenômenos como carbonatação e ação de sulfatos interferem nesse processo. Tanto a carbonatação, que provoca redução do pH, quanto o ataque por sulfato promovem a quebra das ligações entre o  $\text{C}_3\text{A}$  e os cloretos, liberando os íons quimicamente combinados nos cloroaluminatos. Isso faz com que o limite crítico de cloretos seja atingido e o rompimento da camada passiva ocorra com uma quantidade de cloretos total mais baixa (NEVILLE, 1997; RIBEIRO; CUNHA, 2014b; TUUTTI,

1982). A liberação de cloretos devido a ação da carbonatação é representada na Figura 9.

Figura 9 - Liberação dos cloretos ligados à frente de carbonatação.

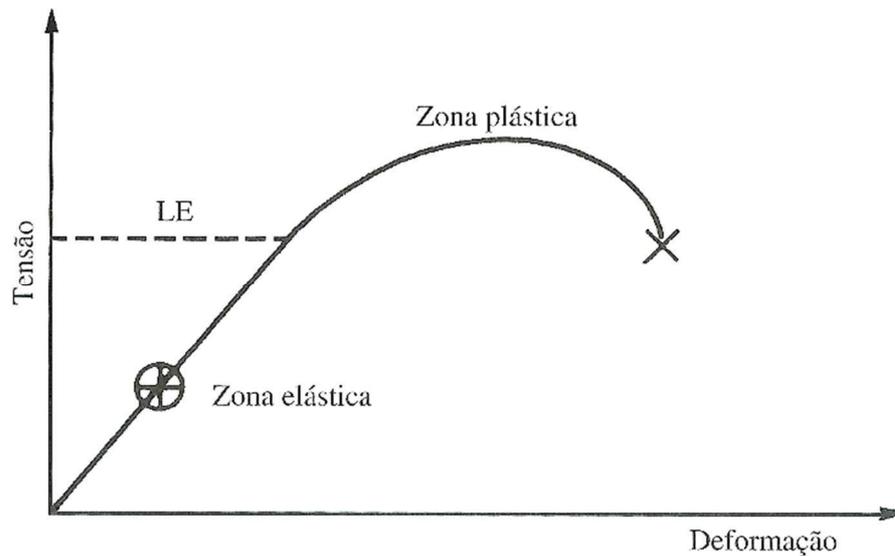


Fonte: Ribeiro e Cunha (2014b, p. 95)

Por isso, a presença e a concentração de cloretos nas estruturas de concreto são fatores de extrema importância e que devem ser levados em consideração. A condutividade pode ser aumentada com o aumento nas quantidades de  $\text{Cl}^-$ , o que pode reduzir a resistividade do concreto e aumentar a velocidade de corrosão das armaduras (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011).

Há ainda a corrosão sob tensão, que também ocorre de forma localizada e é resultado da ação conjunta entre tensão mecânica - ações aplicadas ou residuais - e meio corrosivo. Embora nesse tipo de corrosão não seja observada perda de massa do material, a ação das ações de tensão juntamente com a corrosão levam o material a ruptura em tempo bem mais curto do que a soma das duas ações separadas (HELENE, 1993). Uma curva típica de tensão *versus* deformação que são obtidas ao ar para os materiais estruturais sem considerar a presença de meios corrosivos é apresentada na Figura 10. Com a presença de meio corrosivo pode-se ver que há uma ruptura do material em um ponto bem abaixo do limite de ruptura sem o meio corrosivo.

Figura 10 - Curva típica tensão versus deformação. LE: limite de escoamento; X: ponto de ruptura do material na ausência do meio corrosivo;  $\oplus$ : ponto de ruptura do material na presença do meio corrosivo.



Fonte: Gentil (2011)

Esse processo é verificado geralmente em estruturas de concreto protendido. A ocorrência deste fenômeno, embora raro, pode gerar consequências graves quando comparadas ao concreto convencional, devido às elevadas cargas aplicadas na protensão (GENTIL, 2011).

### 2.1.2 Propagação

Depois que a armadura foi despassivada, a fase de propagação da corrosão inicia, sendo que o desenvolvimento do processo corrosivo pode variar de acordo com condições termodinâmicas, que controlam a cinética das reações (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011; RIBEIRO; CUNHA, 2014b).

Dentre os fatores que mais influenciam o processo corrosivo estão a resistividade elétrica do concreto e a difusão do oxigênio no cátodo. A resistividade atua como um controlador da mobilidade dos íons, dificultando sua circulação. Já o oxigênio tem grande influência sobre as reações de redução, uma vez que a velocidade de oxidação do metal na zona anódica diminui pelo fato de os íons serem consumidos mais lentamente nas reações de redução na zona catódica. Há, então, o controle catódico do processo de corrosão pela carência do oxigênio (CASCUDO, 1997; FIGUEIREDO; MEIRA, 2011).

A umidade do concreto também tem papel importante sobre o processo de corrosão instalado, já que quando a umidade atinge um valor crítico o material começa a corroer mais rapidamente (RIBEIRO; CUNHA, 2014b). Segundo Neville (1997, p. 557), “a umidade relativa ótima para corrosão é entre 70 e 80 por cento”. Ambientes com elevada umidade relativa proporcionam maior presença de eletrólito no concreto, o que facilita a passagem de corrente iônica, acelerando o processo corrosivo. Ao contrário, quando a umidade é baixa, há uma carência de eletrólito, o que aumenta a resistividade do concreto, reduzindo a velocidade de corrosão (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011).

## 2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

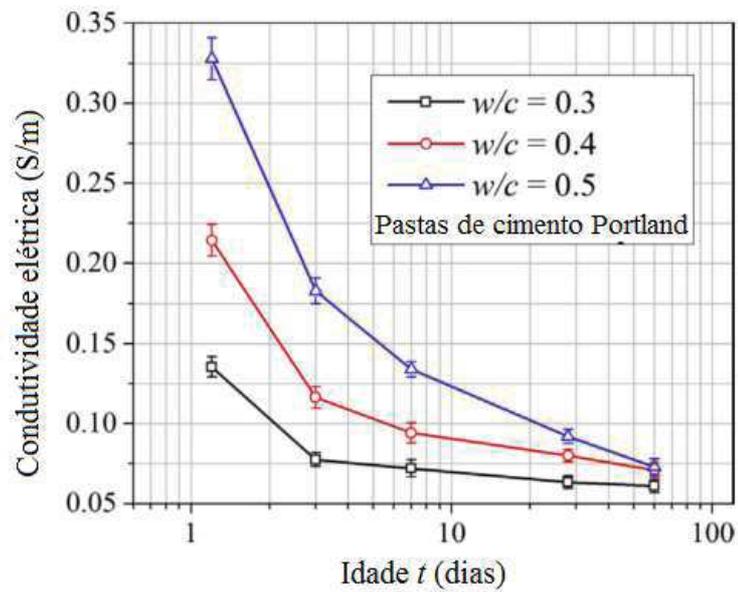
De maneira geral, a resistividade elétrica do concreto depende tanto das propriedades de sua microestrutura quanto da condutividade da solução aquosa dos poros. Em vista disso foram apresentados alguns dos fatores que exercem influência sobre estas propriedades.

### 2.2.1 Relação água/aglomerante e consumo de cimento

A relação água/aglomerante tem grande interferência na resistividade elétrica do concreto. A redução dessa relação provoca não só modificações na estrutura dos poros (seccionamento dos capilares) como também reduz a quantidade de eletrólito circulando por eles, visto que a água passa a ter mais dificuldade de penetrar no concreto. No estudo conduzido por Ma et al (2014), a condutividade elétrica foi avaliada e constatou-se que tanto a evolução da hidratação quanto a redução da relação a/c provocaram redução da condutividade elétrica de pastas de cimento (Figura 11) uma vez que, segundo os autores, ambos os fatores resultam em menor porosidade capilar.

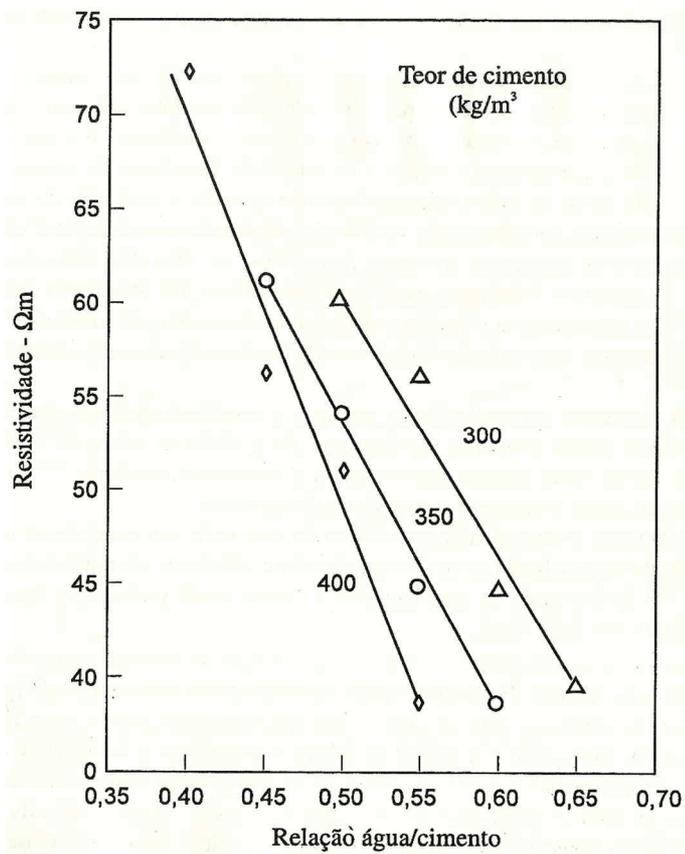
Além disso, para uma mesma relação água/aglomerante, a redução no teor de cimento do concreto provocou aumento na resistividade elétrica, devido a menor disponibilidade de eletrólito (NEVILLE, 1997). Essa relação pode ser vista na Figura 12.

Figura 11 - Evolução da condutividade elétrica de pastas de cimento com a idade.



Fonte: Ma et al (2014, p. 393)

Figura 12 - Relação entre resistividade elétrica, relação água/cimento e consumo de cimento Portland, ensaiado aos 28 dias.



Fonte: Neville (1997, p. 353)

### 2.2.2 Grau de hidratação, tempo e regime de cura

O aumento do grau de hidratação do cimento provoca aumento da resistividade elétrica do concreto (HELENE, 1993; MEDEIROS-JUNIOR; LIMA, 2016; WEI; XIAO; LI, 2012). Inicialmente, logo que a água entra em contato com o cimento, os íons  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $OH^-$  e  $SO_4^{2-}$  se dissolvem dos grãos de cimento, ficando livres na solução dos poros, o que eleva a condutividade elétrica. Conforme o processo de hidratação ocorre, a condutividade sofre redução, pois os íons reagem para formar produtos de hidratação e o teor de sólidos na pasta aumenta, segmentando os capilares pela formação do gel. Desta maneira, os poros capilares são interligados somente pelos poros de gel, o que reduz muito a condutividade elétrica (NEVILLE, 1997; ZUO; WEI, 2015).

O tempo e o regime de cura também têm interferência sobre as propriedades elétricas do concreto. No estudo feito por Antolini (2015), o aumento do tempo de cura de 3 para 7 dias resultou em maior resistência à penetração de cloretos e maior compacidade do concreto. Ademais, Presuel-Moreno, Wu e Liu (2013) evidenciaram que diferentes regimes de cura<sup>3</sup> tiveram grande importância para a evolução da resistividade elétrica do concreto com o tempo. Quando expostos a regimes de cura com altos teores de umidade a resistividade elétrica tende a ser menor que quando expostos a condições de umidade de laboratório.

### 2.2.3 Grau de saturação dos poros (teor de umidade)

O grau de saturação dos poros tem grande influência na resistividade do concreto (HORNBOSTEL; LARSEN; GEIKER, 2013; LI; XU; ZENG, 2016). A água, além de ser necessária para a ocorrência da reação catódica de redução do oxigênio, também influi na resistividade do concreto e na permeabilidade do oxigênio. Se os poros estão saturados, há uma queda na resistividade elétrica, mas o oxigênio encontra dificuldade em chegar até a armadura, o que controla as reações catódicas. Por outro lado, em concretos secos o oxigênio penetra mais facilmente, mas a resistividade é alta, já que os capilares estão segmentados e a passagem de corrente

---

<sup>3</sup> Exposição dos corpos de prova à sala de nevoeiro (câmara úmida), umidade elevada (90~95%) e umidade do laboratório (≈65%)

passa a ser feita pela água de gel, o que reduz muito a velocidade de corrosão (NEVILLE, 1997). Por este motivo, as maiores velocidades de corrosão acontecem em concretos com elevado teor de umidade, porém não saturados, já que há combinação do acesso de oxigênio e de redução da resistividade do concreto (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011; HELENE, 1993).

No estudo conduzido por Chen, Chang e Yeih (2014), para as relações  $a/agl$  0,40 e 0,60, as amostras secas ao ar a uma umidade de 80% tinham resistividade elétrica 6,9 e 8,0 vezes maior, respectivamente, que aquelas em condição saturada superfície seca. Segundo os autores, é provável que as amostras com relação  $a/agl$  0,60 tenham alta porosidade, de modo que o teor de umidade do ambiente teve maior influência sobre a resistividade elétrica.

#### **2.2.4 Porosidade e permeabilidade**

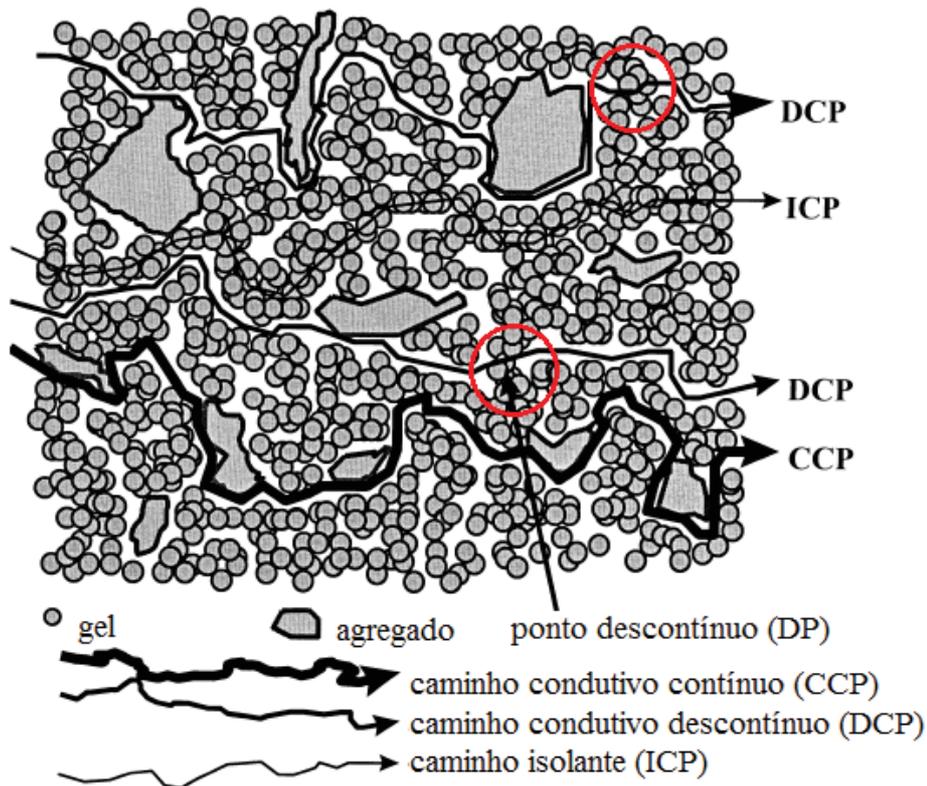
De maneira geral, concretos com menor permeabilidade apresentam maior resistência à penetração de água e de agentes agressivos no seu interior e, conseqüentemente, maior durabilidade. Segundo Neville (1997), a porosidade capilar tende controlar a permeabilidade da pasta de cimento, visto que os poros de gel têm uma porosidade de 28%, mas apresentam permeabilidade muito baixa ( $7 \times 10^{-16}$  m/s). Pelos poros capilares, no entanto, o escoamento de água é muito maior. Por isso, a permeabilidade do concreto depende de fatores como distribuição, dimensões, forma, tortuosidade e continuidade dos poros, e não somente da porosidade total.

Na Figura 13 há uma representação esquemática da estrutura concreto e os possíveis caminhos formados no seu interior durante o processo de hidratação, de acordo com Song (2000). Existem basicamente três tipos de caminhos na estrutura (RIBEIRO, 2014; SONG, 2000):

- Caminhos condutores contínuos (CCP), que são micro poros conectados continuamente por onde ocorre a passagem da corrente elétrica;
- Caminhos condutivos descontínuos (DPC), cuja continuidade é bloqueada por camadas de pasta de cimento, os pontos descontínuos (DP). Devido a essa descontinuidade, não há passagem de corrente elétrica no interior do concreto;
- Caminhos isolantes (ICP), que fazem parte da matriz contínua de concreto, esta composta de partículas de pasta de cimento. Os ICP's podem ou não

conduzir corrente, o que depende da quantidade de água e dos produtos de hidratação no interior dos poros de concreto.

Figura 13 - Representação esquemática da estrutura do concreto

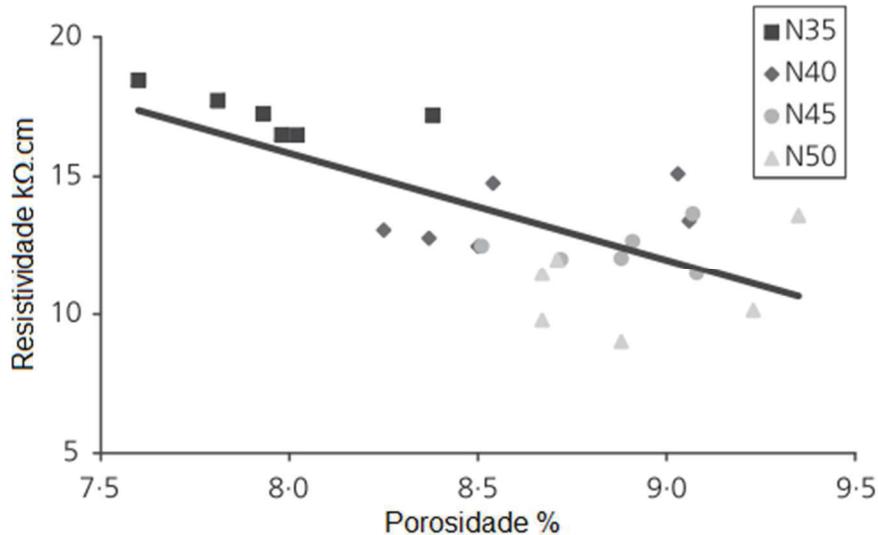


Fonte: Adaptado de Song (2000, p. 1724)

De acordo com resultados obtidos por Kirchheim, Rheinheimer e Dal Molin (2015), a microestrutura do concreto pode ser alterada quando o tipo de cimento é modificado, dependendo das suas características químicas e granulométricas. Além disso, o uso de maior teor de aglomerante e de adições minerais, especialmente as pozolanas, bem como uma redução da relação  $a/agl$ , são fatores que podem reduzir a porosidade da pasta, densificando sua microestrutura (ISAIA, 1995). O refinamento dos poros foi observado por Cruz et al. (2013) em argamassas contendo altas porcentagens de metacaulim e cinza volante e por Stein (2016), em concretos contendo cinza de lodo de ETA. Zaccardi e Di Maio (2014) observaram um relacionamento entre a resistividade elétrica e a porosidade total acessível (parte da estrutura dos poros que é diretamente acessível a partir da superfície da amostra).

Constatarem que o aumento da relação a/agl resultou em aumento da porosidade e redução na resistividade elétrica (Figura 14).

Figura 14 - Relação entre porosidade total acessível e resistividade<sup>4</sup>.



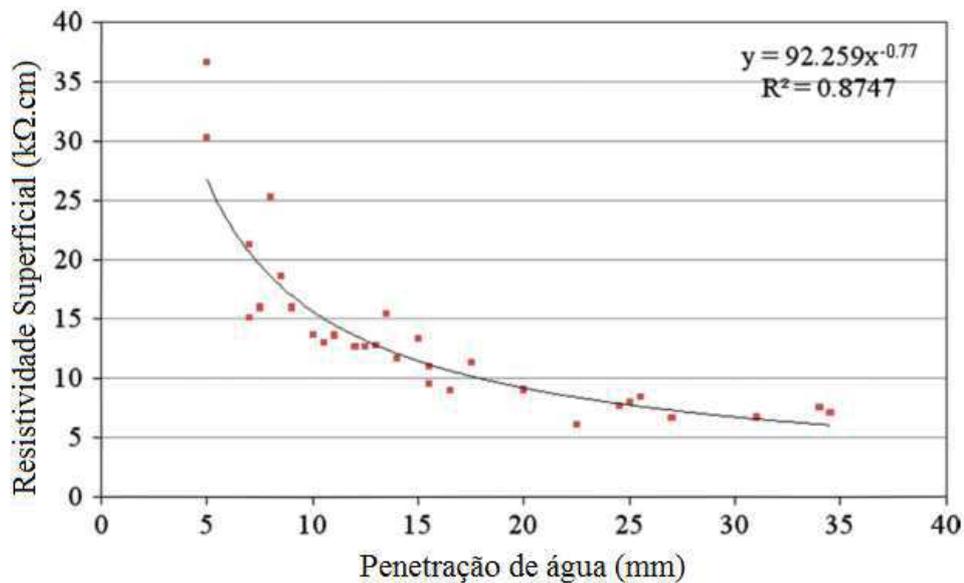
Fonte: Zaccardi e Di Maio (2014, p. 487)

Já uma relação entre resistividade elétrica e penetração de água no concreto foi demonstrada por Ramezaniapour et al. (2011) para misturas contendo metacaulim (Figura 15). Deboucha *et al.* (2015) observaram também decréscimos de absorção capilar em concretos com substituição tanto de EAF quanto de PN em relação ao concreto de referência, sendo que a absorção de água reduziu também com o aumento da porcentagem de substituição.

A durabilidade das estruturas de concreto armado está, portanto, diretamente ligada à porosidade e à permeabilidade (e absorção capilar) do concreto, já que as soluções de eletrólitos e de gases, como o oxigênio, e também substâncias deletérias, como sais e outros agentes agressivos, penetram no concreto nas áreas mais permeáveis e porosas. Isso reduz a resistividade e, conseqüentemente, acelera o processo corrosivo das armaduras (GENTIL, 2011).

<sup>4</sup> A notação N35, N40, N45 e N50 refere-se à relação a/agl do traço (relação a/agl 0,35; 0,40; 0,45 e 0,50; respectivamente).

Figura 15 - Relação entre penetração de água e resistividade superficial para misturas contendo metacaulim.



Fonte: Ramezaniapour et al. (2011, p. 2476)

### 2.2.5 Tipo de cimento e adições minerais

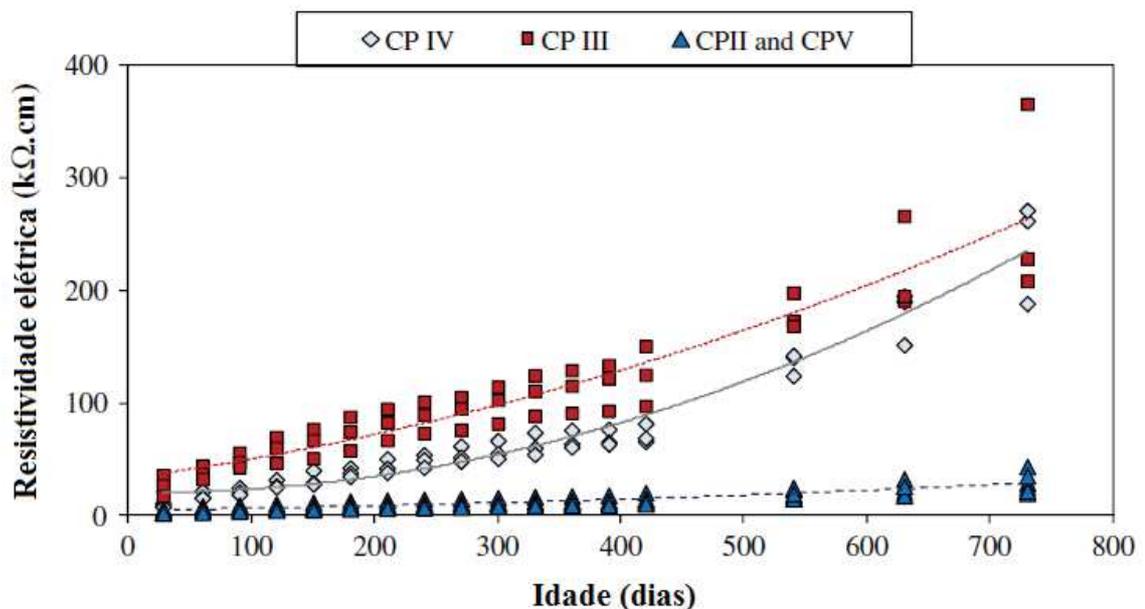
De maneira geral, as adições minerais podem interferir na resistividade elétrica por meio de alterações da concentração e mobilidade de íons da solução aquosa dos poros e pela modificação da microestrutura da pasta. Esta última depende geralmente de variações no teor das adições e nas suas características físicas e químicas, que podem alterar a distribuição dos poros.

Os elementos relacionados à química do cimento, como o tipo de cimento e o teor de álcalis e de  $C_3A$ , também têm influência na resistividade do concreto (WHITING; NAGI, 2003 apud HOPPE, 2005). Segundo Neville (1997, p. 354), “a composição química do cimento controla a presença de íons na água evaporável”, sendo que cimentos aluminosos podem provocar aumento da resistividade dos concretos de 10 a 15 vezes em relação àqueles com cimento Portland comum em mesmas proporções. Por outro lado, misturas que apresentem redução do teor de  $C_3A$  pela incorporação de adições minerais podem ter seus tempos de pega inicial e final aumentados e, por consequência disso, retardo da redução da condutividade elétrica. (TOPÇU; UYGUNOGLU; HOCAOGLU, 2012; ZUO; WEI, 2015).

Medeiros-Junior e Lima (2016) investigaram o comportamento de 4 tipos de cimento comercializados no Brasil quanto a resistividade elétrica: CP II (até 10% filler

calcário), CP III (cerca de 60% de escória de alto forno), CP IV (até 50% de pozolana) e CP V (5% de filler calcário). Os maiores valores de resistividade elétrica foram obtidos para os cimentos com adições minerais (CP III e CP IV), sendo o cimento com adição de escória de alto forno o que obteve os melhores resultados (Figura 16). O aumento da resistividade elétrica para concretos com cimentos que continham adições ocorreu também, segundo os autores, pelo refinamento dos poros e redução da permeabilidade, sendo que as reações de hidratação evoluíram mais com o tempo nos cimentos com adições minerais.

Figura 16 – Aumento da resistividade com o tempo para diferentes tipos de cimento.



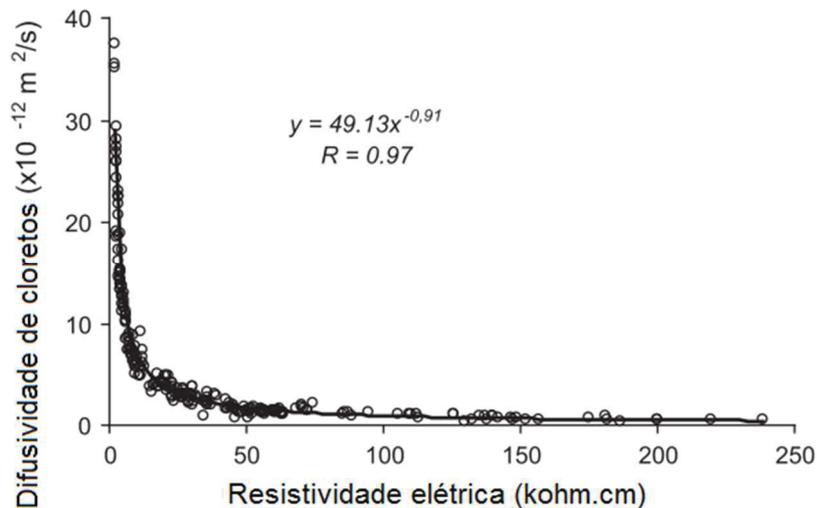
Fonte: Medeiros-Junior e Lima (2016, p. 14)

Topçu, Uygunoglu e Hocaoglu (2012) investigaram o efeito de três adições minerais (cinza volante, sílica ativa e escoria de alto forno) na condutividade elétrica, sendo que a substituição de cada adição mineral usada ocorreu em porcentagens de 0%, 10%, 20% e 30%. De acordo com os autores, o aumento do teor de substituições resultou em redução nos valores de condutividade elétrica.

Sengul (2014) estudou um método rápido para medir a difusividade de cloretos pela medida da resistividade elétrica do concreto. Ele fez o uso de escória de alto forno, cinza volante, sílica ativa e pozolana natural, além do cimento Portland comum. Os resultados obtidos em concretos com diferentes permeabilidades e diversas difusividades estão representados na Figura 17. De maneira geral, os resultados

mostram que há uma relação entre a difusividade de cloretos e a resistividade, havendo uma redução na difusividade com o aumento da resistividade do concreto. Esta pode, segundo os autores, ser utilizada como um indicador de durabilidade.

Figura 17 - Relação entre difusividade de cloretos e resistividade elétrica.



Fonte: Sengul (2014, p. 437)

Rosa (2005) utilizou EAF como substituição ao cimento em teores de 0%, 50% e 70%, além de uma mistura com adição 4% de ativador químico (sulfato de sódio) e 50% de EAF. Pelo método dos 4 eletrodos, o autor obteve aumento da resistividade elétrica aparente (REA) com aumento do teor de substituição, avanço do período de cura, redução da relação  $a/agl$  e com o uso do ativador químico (em relação à amostra de mesma porcentagem de substituição sem ativador). A adição de EAF reduziu a condutividade elétrica específica em relação ao concreto de referência. No entanto, a presença do ativador químico aumentou a concentração de íons na solução dos poros, especialmente do íon  $OH^-$ , o que elevou a condutividade elétrica. Contudo, a resistividade elétrica também aumentou devido à alteração na estrutura de poros promovida pelo ativador, reprimindo o aumento na condutividade elétrica.

Gastaldini et al. (2009) investigou o comportamento de misturas contendo 10%, 20% e 30% de CCA, 35% de CV e 50% de EAF frente a resistividade elétrica aparente por meio do método dos 4 eletrodos (método de Wenner). Para mesmas relações  $a/agl$ , as misturas com adições minerais apresentaram maior resistividade elétrica quando comparadas à amostra de referência, sendo que para as adições de CCA, a

resistividade foi mais elevada quanto maior a porcentagem de substituição. Em todas as amostras analisadas, a condutividade elétrica apresentou aumento quando a resistividade elétrica aumentou. Segundo os autores, este comportamento aparentemente contraditório aconteceu pois, à medida que a relação  $a/agl$  foi reduzida, a concentração iônica tornou-se maior (ion  $OH^-$ ), provocando aumento da condutividade elétrica. Por outro lado, a redução da relação  $a/agl$  tornou a estrutura mais compacta, o que aumentou a resistividade elétrica. Além disso, para volumes de intrusão de mercúrio semelhantes, diferentes resistividades foram encontradas, mostrando que as adições provocaram diferentes distribuições de tamanho de poros e conectividade entre eles.

### **2.2.6 Agregados**

Outro fator influente é o teor de agregados utilizados no concreto. Princigallo, Breugel e Levita (2003) observaram que a condutividade elétrica do concreto diminuiu com o aumento do teor de agregado (de 10 a 75%) e que a zona de transição pasta-agregado apresentou maior condutividade elétrica que o volume de pasta.

Sengul (2014), investigou o efeito do tipo de agregado graúdo na resistividade elétrica de concretos com cimento Portland. O autor notou que a resistividade elétrica aumentou com o conteúdo de agregado. O mesmo comportamento foi observado por Hou et al. (2017). Estes autores observaram também que não houve correlação significativa entre porosidade e o teor de agregado graúdo, indicando que estes aumentaram a resistividade do concreto simplesmente pela introdução de obstáculos elétricos na pasta de cimento, sem afetar sua porosidade.

### **2.2.7 Temperatura do meio, presença de íons agressivos e natureza da corrente**

A temperatura também tem um impacto significativo na resistividade, sendo que seu efeito pode ocorrer de duas maneiras distintas. Por um lado, o seu aumento proporciona elevação na condutividade elétrica da solução dos poros e reduz a viscosidade do eletrólito. Isso intensifica a mobilidade dos íons pela microestrutura do concreto e promove aumento da velocidade de corrosão. Por outro lado, sua redução gera condensações no concreto, resultando em aumentos locais de umidade do

material, o que pode gerar diferença de potencial e, conseqüentemente, mobilidade iônica (CASCUDO, 1997; ØSTVIK JR, 2004).

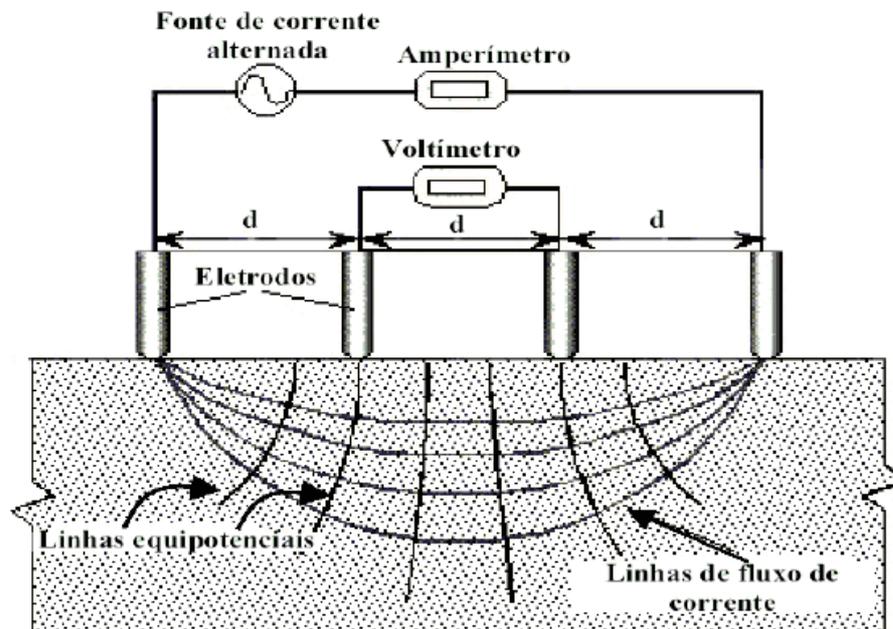
Íons agressivos como sais de cloretos, sulfatos e nitratos, entre outros, interferem na resistividade elétrica do concreto, pelo aumento da concentração iônica da solução aquosa dos poros. Com isso há uma redução da resistividade e elevação da condutividade elétrica, que possibilita fluxo de elétrons, característico do mecanismo eletroquímico (GENTIL, 2011; HOPPE, 2005).

De acordo com Helene (1993) a natureza da corrente que atravessa o concreto, se é contínua ou alternada, também tem influência na resistividade elétrica. A corrente contínua (CC) provoca o efeito da polarização, resultando em valores maiores do que aqueles obtidos quando corrente alternada (CA) é aplicada para as medições. É sugerido que a medição da resistividade do concreto seja feita utilizando corrente alternada (HORNBOSTEL; LARSEN; GEIKER, 2013), com frequência entre 50 e 1000 Hz (POLDER, 2001). Para baixas temperaturas e elevados teores de umidade, frequências na ordem de 100 Hz a 10 kHz são indicadas (Østvik, 2006 apud HORNBOSTEL; LARSEN; GEIKER, 2013).

### 2.3 MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Um dos métodos que podem ser empregados para a medição da resistividade elétrica é o dos quatro eletrodos (método de Wenner), que é normalizado pela NBR 7117 (ABNT, 2012) para medição da resistividade do solo. Este método foi adaptado para medições no concreto, sendo a sonda de Wenner (Figura 18) uma configuração amplamente aceita na qual dois eletrodos internos medem a diferença de potencial elétrico criado quando os eletrodos externos aplicam uma corrente alternada (CA) no concreto (LAYSSI et al., 2015). A resistividade elétrica medida é, portanto, a superficial (ou resistividade elétrica aparente).

Figura 18 - Método dos quatro eletrodos para medição da resistividade elétrica do concreto.



Fonte: Carino (1998 apud HOPPE, 2005, p. 64)

Medeiros Filho (1981, p. 295) propôs a Equação 3 para o cálculo da resistividade do concreto para este método.

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

sendo:

$$k = \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot d}{1 + \frac{2 \cdot d}{\sqrt{d^2 + 4 \cdot b^2}} - \frac{2 \cdot d}{\sqrt{4 \cdot d^2 + 4 \cdot b^2}}} \right) \quad (3)$$

onde

$\rho$  é a resistividade elétrica ( $\Omega \cdot m$ )

$R$  é a resistência do concreto ( $\Omega$ )

$d$  é a distância de separação entre as hastes (m)

$b$  é a profundidade das hastes (m)

Segundo o mesmo autor, quando o valor de “b” é pequeno em comparação à distância “d” (com relação entre os valores tais que  $b \leq d/20$ ), a resistividade pode ser calculada pela Fórmula Simplificada de Palmer, conforme Equação 4.

$$\rho = 2. \pi. d. R \quad (4)$$

O método dos quatro eletrodos, por ser rápido, simples e não destrutivo, é ideal para medições de resistividade *in loco*. No entanto, a presença de fendas e de barras de reforço podem afetar as medições. Ademais, como o efeito do contato eletrodo-concreto não exerce influência significativa neste método, as medições podem ser feitas com frequências variando entre 10 Hz e 10 kHz (LAYSSI et al., 2015).

Alguns estudos recentes empregaram um equipamento comercial para medidas de resistividade elétrica superficial (ANDRADE; D’ANDREA; REBOLLEDO, 2014; CHEN; CHANG; YEIH, 2014; PRESUEL-MORENO; WU; LIU, 2013; RAMEZANIANPOUR et al., 2011), que possui o mesmo princípio do método de Wenner. Este equipamento possui quatro eletrodos com pontas de madeira úmida para fazer contato, sendo os dois externos fixos e os dois internos móveis, o que proporciona melhor ajuste à superfície no momento da medição (representação do equipamento no item 4.6.1, Figura 30).

A resistividade elétrica medida com este equipamento pode apresentar alteração caso o espaçamento das sondas ou as dimensões das amostras variem (CHEN; CHANG; YEIH, 2014). O estudo de Morris, Moreno e Sagüés (1996) já relatava a necessidade de uma correção dos valores de medições feitas com este tipo de equipamento quando a amostra for cilíndrica. Segundo os autores, a resistividade elétrica resultante desta correção, chamada real ( $\rho_{real}$ ), pode ser definida como a razão entre a resistividade elétrica mostrada no visor do equipamento comercial ( $\rho_{eq}$ ), e um fator  $K$  (considerado um fator de forma) conforme a

$$\rho_{real} = \frac{\rho_{eq}}{K} \quad (5)$$

A metodologia apresentada por Morris, Moreno e Sagüés (1996), necessita de informações como altura ( $h$ ) e diâmetro ( $d$ ) do corpo de prova e adoção de um valor de espaçamento dos eletrodos ( $a$ ) para o cálculo de razões  $h/a$  e  $d/a$ , necessárias

para definição do fator  $K$ . De acordo com Chen, Chang e Yeih (2014), dessa forma é possível a obtenção de valores precisos de resistividade elétrica do concreto, independentemente do tamanho e espaçamento das sondas do equipamento de medição.

### 3 CLETA COMO ADIÇÃO MINERAL NO CONCRETO

O cimento é composto principalmente por  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Há possibilidade, em teoria, que alguns materiais que contenham compostos químicos semelhantes a esses óxidos possam ser empregados como substituição parcial do cimento no concreto. O lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) pode ser um desses materiais, já que os principais componentes químicos do cimento são também encontrados no lodo:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$  (CHEN; MA; DAI, 2010; RICHTER, 2001). O lodo de ETA, no entanto, ainda foi pouco estudado. Sua composição química é, todavia, semelhante àquela da argila calcinada (ALUJAS et al., 2015; TIRONI et al., 2012a, 2014), que vem sendo estudada por diversos autores, sozinha ou juntamente com o calcário como adição mineral ao concreto.

#### 3.1 ARGILA CALCINADA E CALCÁRIO MOÍDO COMO ADIÇÕES MINERAIS

De maneira geral, os principais compostos químicos presentes nas argilas são a sílica e alumina, e a caulinita e o quartzo aparecem como os principais componentes mineralógicos. No entanto, os teores tanto de composição química como mineralógica variam, dependendo do tipo de argila utilizada.

A partir do processamento de uma argila caulínica de alto teor de pureza por calcinação em temperaturas entre  $650\text{ }^\circ\text{C}$  e  $800\text{ }^\circ\text{C}$ , obtém-se o metacaulim (MK). Este contém sílica e alumina na fase ativa, que reagem com o hidróxido de cálcio (SABIR; WILD; BAI, 2001). Segundo os autores, “os níveis ótimos de substituição de CP por MK estão associados com mudanças na natureza e na proporção dos diferentes produtos de reação (dependendo da composição), temperatura e tempo de reação, os quais são formados nos sistemas CP-MK” (SABIR; WILD; BAI, 2001, p. 442 tradução nossa). De acordo com Lea (1970 apud SABIR; WILD; BAI, 2001), a remoção da água das camadas cristalinas da argila está associada à reatividade pozolânica das argilas calcinadas, resultando em um material amorfo ou semi-amorfo com alta área superficial e alta reatividade química.

De acordo com Al-Rawas et al. (1998), a temperatura de calcinação ótima para obtenção de material pozolânico deve situar-se entre a extremidade de desidroxilação e o início da recristalização. Além disso, a natureza dos minerais da argila, bem como a energia térmica necessária para liberar os íons hidroxilas são fatores que

determinam a temperatura de calcinação necessária (SABIR; WILD; BAI, 2001). Samet, Mnif e Chaabouni (2007) obtiveram um intervalo de temperatura de calcinação de 600 a 800 °C, por meio de análise térmica. Bons desempenhos para argilas calcinadas em temperaturas neste intervalo foram observados em estudos feitos por outros autores (ANDRÉS et al., 2015; MARTIRENA et al., 2011; SINGH; GARG, 2006; TIRONI et al., 2012a, 2014).

De acordo com os resultados obtidos por Tironi et al. (2012b) e Tironi et al. (2014), a estrutura da argila caulinítica tem influência significativa sobre sua reatividade. Quando calcinadas a temperaturas de 700 ou 750 °C, o maior consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  foi observado nas misturas contendo argilas com estrutura desordenada, mesmo que com menor teor de caulinita (na argila bruta). Observou-se também que a argila com estrutura mais desordenada resultou em maior área superficial específica BET e também maior atividade pozolânica. Segundo Sabir, Wild e Bai (2001), a superfície específica influencia a taxa de dissolução da sílica amorfa/cristalina, que produz sílica em solução na água dos poros e reage com o hidróxido de cálcio para formar C-S-H, tendo efeito sobre a atividade pozolânica.

De acordo com Tironi et al. (2013), a grande superfície específica das argilas calcinadas tem mais efeito sobre a atividade pozolânica a curto prazo, enquanto que a longo prazo, a atividade pozolânica está relacionada com a composição mineralógica e química das fases amorfas das argilas calcinadas. Este efeito foi percebido por Alujas et al. (2015). Segundo estes autores, a substituição parcial do cimento por argilas calcinadas impactou sobre os produtos de hidratação combinando um efeito de enchimento sobre as idades precoces e de reação pozolânica em idades mais avançadas. Argilas calcinadas com fases ricas em aluminato altamente reativo favorecem a formação de fases AFm típicas e influenciam a microestrutura dos produtos de hidratação, já que a alumina reativa tende a substituir a sílica da estrutura do C-S-H, formando uma fase hidratada referida, muitas vezes, como C-A-S-H (Aluminossilicato de Cálcio Hidratado) (LOPEZ, 2009; TIRONI et al., 2013)

Relação entre finura e teores de substituição de argilas calcinadas foi estudada por Samet, Mnif e Chaabouni (2007). Segundo os resultados obtidos pelos autores, a porcentagem de substituição de cimento e a finura da argila calcinada regulam as propriedades mecânicas das misturas de cimento. O aumento da finura e a redução da porcentagem de substituição provocaram aumento da resistência à compressão das amostras estudadas. O aumento da área superficial específica possibilitou

aumento das porcentagens de substituição, sendo que uma composição ótima de cimento misturado encontrada pelos autores foi uma temperatura de calcinação de 700 °C, 30% de argila calcinada e finura Blaine de 7.700 cm<sup>2</sup>/g.

O uso de argila com baixo teor de caulinita (inferior a 40%) foi estudada por Martirena et al. (2011) e por Alujas et al. (2015). As argilas de ambos os estudos foram calcinadas a diferentes temperaturas por 60 minutos, sendo que a maior reatividade pozolânica foi obtida para temperatura de queima de 800°C. Segundo Alujas et al. (2015), a reatividade pozolânica parece ser devido à desidroxilação da caulinita em temperaturas próximas a 600 °C, sendo que a desordem estrutural continua aumentando com o aumento da temperatura de calcinação. No entanto, este aumento de reatividade pozolânica fica limitada, de acordo com os autores, não só pela recristalização em temperaturas superiores a 900 °C, mas também pela redução da área superficial específica entre 800 e 900 °C. Os resultados experimentais indicam que argilas com teores moderados de caulinita constituem uma fonte potencial de materiais pozolânicos de alta reatividade por meio de tratamento térmico.

Antoni et al. (2012) investigaram as propriedades de misturas com adição de metacaulim e calcário. As misturas ternárias continham uma proporção em peso de 2:1 (metacaulim: calcário) e um teor de substituição total de 15%, 30%, 45% e 60%. Para fins de comparação, misturas binárias com substituição de calcário (15%), metacaulim (30%), e quartzo (mesmas proporções de substituição daquelas com mistura de metacaulim e calcário) foram feitas. Em relação às propriedades mecânicas, misturas ternárias com substituição de até 45% da mistura contendo metacaulim e calcário, na proporção 2:1, mostram melhoras tanto aos 7 quanto aos 28 dias. A mesma configuração de mistura, com 60% de substituição do cimento, mostrou um aumento de resistência de 330% em relação àquela somente com quartzo. A análise termogravimétrica mostrou que as reações entre metacaulim e calcário consumiram o hidróxido de cálcio, sendo que para misturas com alto teor de substituição (60%) este consumo é quase total aos 7 dias o que pode, segundo os autores, limitar o desenvolvimento de resistência nessa mistura. O consumo de Ca(OH)<sub>2</sub> é mais elevado nas amostras com mistura de metacaulim e calcário do que naquelas que continham somente calcário ou somente metacaulim como substituição de cimento. De acordo com os autores, o metacaulim parece reagir mais rapidamente na presença do calcário, o que indica uma relação sinérgica entre essas duas adições quando unidas.

Este efeito sinérgico já havia sido observado por Steenberg et al. (2011). Por meio de observação do grau de hidratação das misturas estudadas, os autores perceberam que os materiais cimentícios suplementares empregados na pesquisa (cal, metacaulim, argila esmectita e filler inerte) aceleraram a hidratação da alita. No entanto, este efeito foi mais pronunciado nas misturas que continham calcário. Segundo os autores, isso pode ser consequência do tamanho das partículas do calcário, que por serem menores funcionam como ponto de nucleação para formação do C-S-H. Além disso, as misturas contendo calcário e argila calcinada em teor total de substituição de 30% apresentaram valores de resistência mais elevados que a amostra de referência (109%), o que não aconteceu quando estes materiais foram empregados isoladamente. Este efeito se elevou quando o teor de alumina foi maior, já que mais calcário foi consumido na presença de quantidades mais elevadas de alumina, disponível a partir de argilas calcinadas.

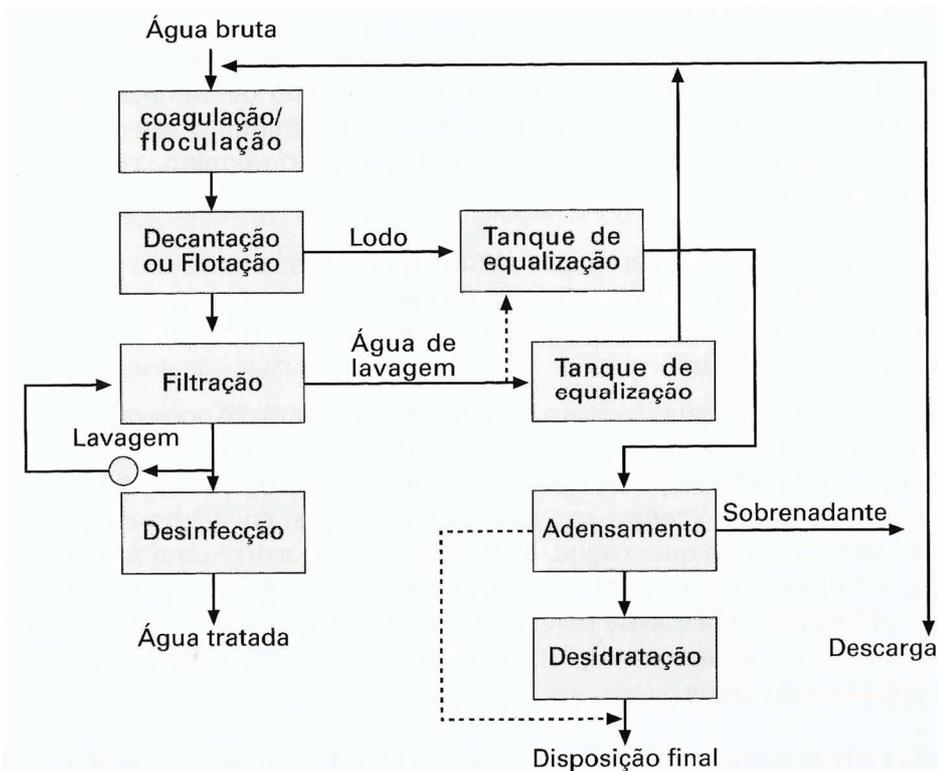
A partir da premissa de que a combinação de calcário e argila calcinada apresentam boas resistências iniciais, Andrés et al. (2015) estudaram a influência relativa da distribuição do tamanho de partículas de cada componente da mistura. Para isso, tomaram como base a mesma configuração de mistura ternária empregada por Antoni et al. (2012), com 45% de substituição de clínquer por uma mistura de proporção 2:1 de argila calcinada e calcário. Segundo os autores, o efeito da finura do clínquer foi o mais importante, sendo que para o clínquer mais fino o pico de hidratação ocorreu mais cedo e foi mais intenso, fornecendo superfície para nucleação do C-S-H. Processo semelhante ocorreu para a argila calcinada mais fina em idades precoces, formando também pontos de nucleação para a hidratação do cimento. Além disso, mistura feita com argila calcinada mais fina apresentou refinamento dos poros consideravelmente maior e porosidade total mais baixa em comparação com a mistura feita com argila calcinada mais grossa. Em relação ao calcário moído, sua adição conjunta com a argila calcinada apresentou melhoras na resistência à compressão na ordem de 10 a 15% em todas as idades. No entanto, o efeito da finura do calcário foi mais pronunciado em idades precoces. A partir dos resultados obtidos, os autores indicaram que a hidratação do clínquer pode ser aumentada com o aumento da finura dos materiais cimentícios suplementares, provavelmente pelo efeito de nucleação, que pode compensar o efeito da diluição.

### 3.2 ESTUDOS PRÉVIOS COM A CLETA COMO ADIÇÃO MINERAL

Para a produção de uma água potável a partir da água disponível na natureza é necessário levar em conta a natureza da água bruta e a qualidade desejada para a água tratada. A partir disso, a seleção dos processos de tratamento deve ser feita de modo que haja remoção ou redução de certos constituintes da água bruta (RICHTER, 2009).

De acordo com Cordeiro (1999), a transformação da água bruta em água que esteja de acordo com os padrões de potabilidade pode ser feita pelo sistema de tratamento completo ou convencional em uma Estação de Tratamento de Água (ETA). Este tratamento é ilustrado na Figura 19 e engloba os processos de coagulação, floculação, decantação e filtração. Durante a fase de coagulação, compostos químicos são adicionados à água, sendo os mais comuns os sais de alumínio ou de ferro. Segundo Richter (2009), o coagulante mais utilizado tem sido o sulfato de alumínio –  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$ . Esses processos e operações geram resíduos, sendo o lodo o gerado em maiores volumes.

Figura 19 – Representação da cadeia de processos de uma ETA convencional.



O maior volume de lodo é produzido durante as fases de decantação (ou flotação) e lavagem dos filtros, e a porcentagem de lodo removida varia entre 0,2 e 5% do volume tratado pela ETA, dependendo de sua origem. Durante a fase de coagulação da água para remoção de cor e turbidez com sais de alumínio e ferro, fatores como a natureza físico-química da água bruta, eficiência hidráulica das unidades de processo e o tipo e a dose de coagulante aplicado afetam a porcentagem de lodo que fica em cada etapa. Entre 60 e 95% do lodo pode ficar acumulado nos tanques de decantação e o restante nos filtros, sendo que quanto maior o tempo que ele fica acumulado, maior a concentração de sólidos, pelo efeito do adensamento (RICHTER, 2001).

O lodo de ETA, por ser o produto da coagulação da água bruta, apresenta composição final semelhante a água que lhe deu origem, acrescido dos produtos resultantes do coagulante. De acordo com RICHTER (2001), os principais componentes químicos do cimento são também encontrados no lodo de ETA. A Tabela 1 é um resumo das características dos lodos empregados em alguns dos estudos citados neste trabalho. Os resultados mostram sílica ( $\text{SiO}_2$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) como sendo os principais compostos químicos.

Tabela 1 - Características dos lodos estudados pelos autores.

(continua)

Autor	Estado do lodo	Composição	
		Química	Mineralógica
Hoppen et al (2005)	seco	$\text{SiO}_2$ - 16,55% $\text{Al}_2\text{O}_3$ - 13,07% $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - 4,15%	caulinita (após sedimentação natural do lodo)
	calcinado (800 °C)	-	$\text{Al}_2\text{SiO}_5$ , $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ , $\text{SiO}_2$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_{0,3}\text{Fe}_3\text{Si}_{0,7}$
Batalha e Rocha (2013)	calcinado (650 °C – 3h)	$\text{SiO}_2$ - 27,5% $\text{Al}_2\text{O}_3$ - 54,9% $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - 12,3%	metacaulinita e fases cristalinas de quartzo e anatásio
Santos et al. (2014)	seco ao sol	$\text{SiO}_2$ - 41,49% $\text{Al}_2\text{O}_3$ - 27,565% $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - 7,875%	quartzo, gipsita e caulinita

(conclusão)

Autor	Estado do lodo	Composição	
		Química	Mineralógica
Hengen (2014)	in natura	SiO <sub>2</sub> - 52,0% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 20,1% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 9,95%	quartzo, caulinita, hematita, anordita e sanidina
	calcinado (600 °C - 1h)	SiO <sub>2</sub> - 66,2% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 17,7% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 8,76%	quartzo, hematita, ortoclásio, albita e muscovita
El-Didamony, Khalil e Heikal (2014)	queimado (850 °C - 2h)	SiO <sub>2</sub> - 54,1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 28,84% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 9,92%	-
Ramirez et al. (2015)	úmido calcinado (700 °C)	SiO <sub>2</sub> - 24,2% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 23,2% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 17,9%	quartzo, caulinita e goethita nas frases cristalinas, com teores de sílica, alumínio e ferro mais elevados <sup>5</sup>

Fonte: Autora

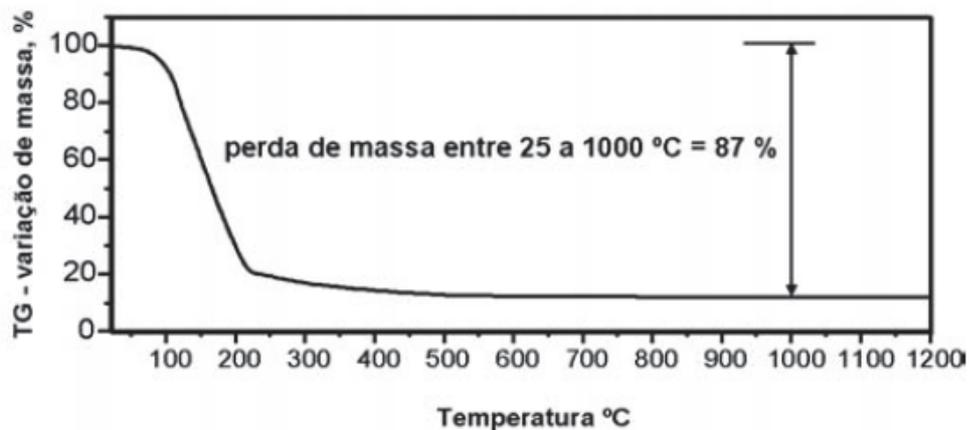
Hoppen et al. (2005) investigaram uma alternativa para o emprego de lodo de ETA, ainda úmido, em matrizes de concreto. As substituições foram de 3%, 5%, 7% e 10% em relação ao peso da areia, havendo uma economia de até 4% no consumo do cimento à medida que se acrescia o teor de lodo. Segundo análises termogravimétricas (Figura 20), entre 25°C e 1000°C a perda de massa média do lodo in natura foi de 87%, correspondendo à eliminação de água adsorvida, decomposição de alguns materiais constituintes, hidroxilas e matéria orgânica (Santos (1997) apud HOPPEN et al., 2005). O valor médio de massa específica do lodo in natura foi de  $(1,06 \pm 0,013)$  mg/m<sup>3</sup> e a perda ao fogo de 49,79%.

Batalha e Rocha (2013) fizeram a caracterização da cinza do lodo da ETA da cidade de Manaus, com calcinação do lodo a 650°C durante 3 horas e posterior moagem, por 16 horas. A massa específica encontrada para o lodo de ETA calcinado foi de 2,60 g/cm<sup>3</sup> e a perda ao fogo, de 5,92%. Segundo os autores, a presença dos elementos encontrados no lodo (apresentados na Tabela 1) se deve, principalmente, à adição de sulfato de alumínio durante o processo de coagulação (que podem ser também encontrados na água bruta a ser tratada). Após moagem, o diâmetro médio

<sup>5</sup> Segundo os autores, teores de sílica, alumínio e ferro mais elevados são características dos argilominerais.

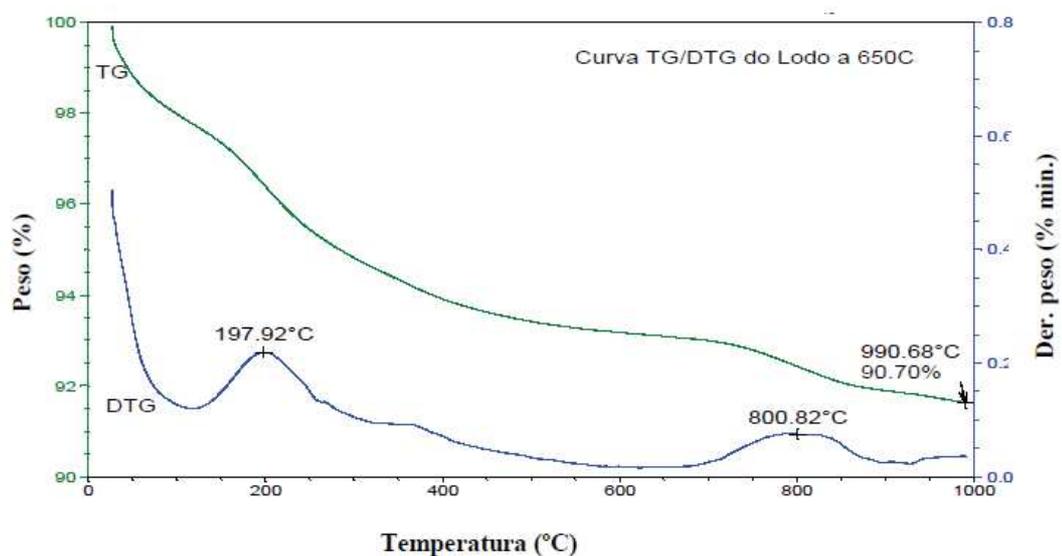
das partículas de lodo foi de 13,00  $\mu\text{m}$ . Por meio da Figura 21 pode-se observar uma redução de 90,70% do teor de lodo de ETA calcinado em relação à massa inicial de lodo, na temperatura de 990,68  $^{\circ}\text{C}$ . A cinza obteve perda de massa de 9,3%, de acordo com a análise termogravimétrica (TG). Segundo os autores, de acordo com a análise termogravimétrica diferencial (DTG<sup>6</sup>), na temperatura de 800,82 $^{\circ}\text{C}$  há uma quebra da estrutura da metacaulinita para formação da mulita primária.

Figura 20 - Curva termogravimétrica do lodo empregado por Hoppen et al. (2005).



Fonte: Hoppen et al. (2005, p. 89)

Figura 21 - Curvas TG e DTG do lodo calcinado a 650  $^{\circ}\text{C}$  utilizado por Batalha e Rocha (2013).



Fonte: Batalha e Rocha (2013, p. 6)

<sup>6</sup> DTG: termogravimetria derivada

De modo a avaliar a resistência mecânica de pastas e argamassas com substituição de lodo de ETA seco ao sol, Santos et al. (2014) analisaram corpos de prova em 3 etapas. Na primeira, o cimento foi substituído por 0%, 3%, 5% e 7 % de lodo em pastas; na segunda etapa, 0%, 3%, 4%, 5% e 7 % de lodo substituíram a areia em argamassas; em uma terceira etapa, 0%, 5%, 7%, 8%, 9% e 10 % substituíram a areia, sob condição de cura ao ar ou submersa em água após desmoldagem (esta ocorreu depois de 24 horas secando ao ar). Após 28 dias de cura, os melhores resultados obtidos para as argamassas foram para mistura com substituição de 7% de areia por lodo de ETA sob cura em água. A substituição de lodo por cimento foi descartada devido à redução significativa de resistência em relação a amostra de referência sem lodo (26,6%) e em relação àquela esperada (11,3%).

A fim de analisar as propriedades físicas e mecânicas de argamassas com substituição do cimento por cinza de lodo de ETA, Batalha e Rocha (2014) utilizaram lodo de ETA calcinado a 650°C<sup>7</sup> em teores de 5%, 10% e 15% de substituição em massa de cimento. Os valores de sílica, alumina e hematita encontrados (somatório total de 94,74%) são superiores ao mínimo exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2015). No entanto, devido ao índice de atividade pozolânica com o cimento ser de 61,49%, abaixo dos 70% estabelecidos por esta norma técnica, a CLETA foi classificada como material de enchimento (fíler), e não pozolânico. Os resultados dos ensaios mostraram que a absorção por capilaridade sofreu redução em todas as amostras com adição de CLETA, sendo que a amostra com 10% apresentou os melhores resultados (Figura 22). A adição de 5% de cinza promoveu refinamento dos poros, apresentando redução dos macroporos em 15,64% e aumento de 4% nos mesoporos. A partir dos resultados de resistência à compressão, as porcentagens de 5 e 15% de substituição apresentaram valores muito próximos entre si e estatisticamente iguais a argamassa de referência. Estes resultados indicaram o efeito físico (fíler) que a cinza de lodo de ETA provocou na matriz cimentícia.

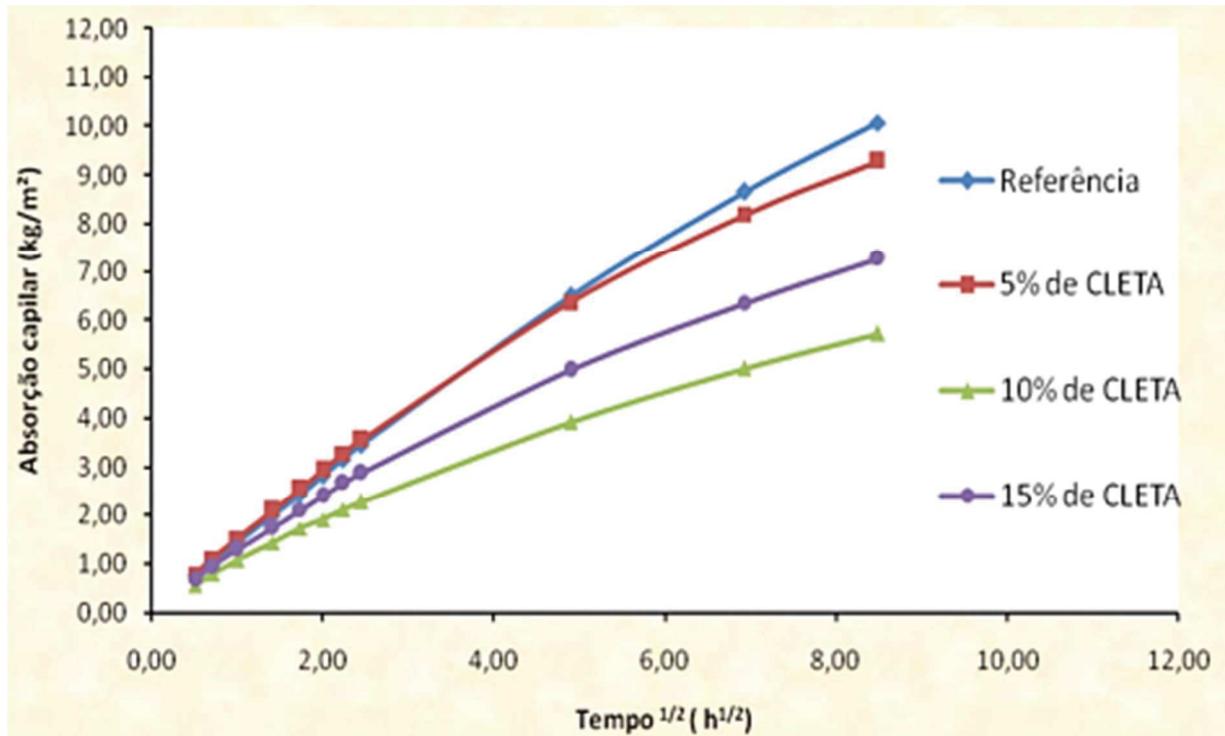
Hengen (2014) caracterizou cinza de lodo de ETA para uso em concreto. Para a cinza analisada, os ensaios realizados a partir do método Chapelle modificado e do índice de desempenho com cimento Portland indicam que a melhor temperatura de

---

<sup>7</sup> Segundo os autores, nesta temperatura e sem presença de matéria orgânica, a estrutura cristalina sofre alterações, desenvolvendo atividade pozolânica.

queima foi de 600 °C com tempo de permanência de uma hora<sup>8</sup>, seguido de tempo de moagem de duas horas em moinho de bolas de aço. De acordo com o mostrado na Tabela 1, os teores de sílica, hematita e alumina somam 82,05% no lodo in natura e 92,66% no lodo calcinado, o que atende ao mínimo exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2015). A perda ao fogo do lodo calcinado foi de 3,37, inferior ao limite máximo de 10% estabelecido pela mesma norma técnica. A partir de resultados termogravimétricos, a amostra de lodo de ETA calcinado apresentou um teor de caulinita de 37%. As argilas mais indicadas para fabricação de pozolanas termicamente ativas são aquelas com teor mínimo 50% de argilominerais e com menor conteúdo de quartzo associado, o que não é característica deste material. Contudo, com base nos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão (para substituições de 0 a 30%, os acréscimos foram de 1 a 30% aos 7 e aos 28 dias), a autora sugere que seu uso não deve ser descartado, principalmente em países em desenvolvimento.

Figura 22 - Absorção capilar das argamassas com CLETA estudadas por Batalha e Rocha (2014).



Fonte: Batalha e Rocha (2014, p. 10)

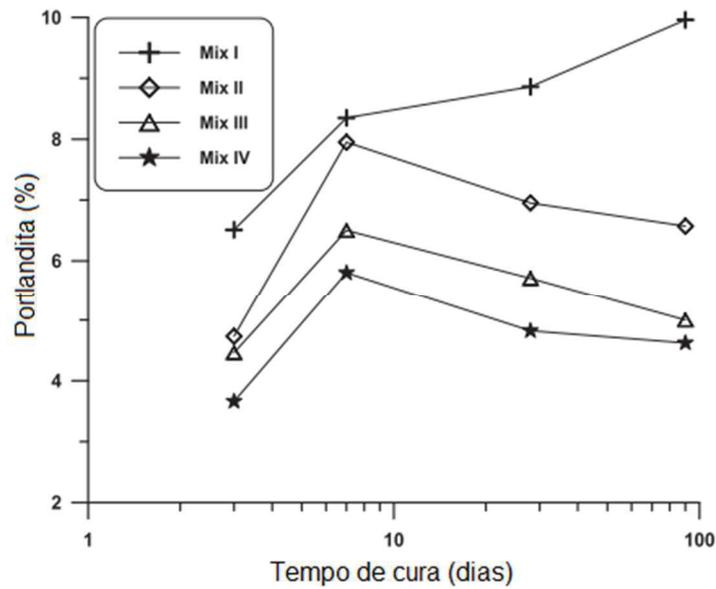
<sup>8</sup> Segundo Gastaldini et al. (2015), a atividade pozolânica tende a reduzir com tempos de residência mais elevados devido a aglomeração das partículas, que começam a fundir em conjunto.

Em estudo comparativo de desempenho de misturas preparadas com cinza de lodo de ETA (HENGEN, 2014) e cinza de casca de arroz (CCA) e sílica ativa (SA) (GASTALDINI et al., 2014), em mesmas proporções, Gastaldini et al. (2015) observaram que os valores de resistência à compressão foram mais elevados com o uso de CLETA. No entanto, a concentração de hidróxido de cálcio fixado, pelo ensaio Chappelle modificado foi mais elevada para a CCA e para a SA. Segundo os autores, este é um indício de que este teste não pode ser usado para descartar o uso de uma adição mineral. Além disso, resultados do estudo de viabilidade econômica mostraram uma redução de consumo de cimento de 37 a 200 kg/m<sup>3</sup>, sendo que essa economia variou conforme o nível de resistência necessária e da concentração de cinzas de lodo de ETA utilizadas.

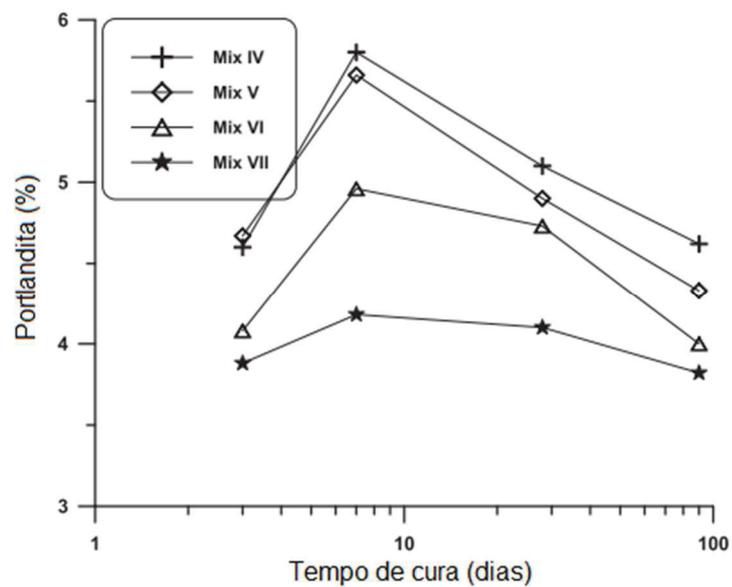
El-Didamony, Khalil e Heikal (2014) analisaram características de 6 tipos de pastas de cimento compostas, além de uma mistura de referência com 100% de cimento Portland comum (CP). Três delas continham teores de EAF em proporções de 10%, 20% e 30%. Nas outras três, 5%, 10% e 15% de lodo de ETA queimado (a 850°C por 2 horas) substituíram a EAF, num total de 30% de substituição do cimento. Por meio do estudo das características de hidratação das pastas de cimento compostas, pode-se notar um aumento do conteúdo de portlandita livre até os 7 dias e decréscimo com o tempo até os 90 dias. Segundo os autores, este comportamento foi resultado não só da redução da parcela de cimento Portland pela adição, mas também do fato que, até os 7 dias, a taxa de liberação de portlandita superou a taxa de hidratação da EAF. Quando a EAF foi substituída em certa porcentagem por lodo de ETA queimado, o conteúdo de portlandita livre foi ainda menor, indicando que o lodo queimado apresentou maior atividade pozolânica que a EAF (Figura 23).

Além do conteúdo de portlandita livre, El-Didamony, Khalil e Heikal (2014) observaram o conteúdo de água combinada, que aumentou com o tempo de cura. Este aumento foi maior para as misturas contendo lodo de ETA queimado. Segundo os autores, esse comportamento indicou que o conteúdo de quartzo presente no lodo atuou como agente de nucleação. Este fator, somado à redução do tamanho das partículas deste material em comparação com a EAF, aumentaram a taxa de hidratação. Os valores de resistência à compressão aumentam com 5% de lodo de ETA queimado, mas foram reduzindo com o aumento da porcentagem de substituição. As áreas de superfície específica e volume de poros apresentaram redução com o tempo de cura e aumento com o teor de lodo de ETA queimado.

Figura 23 - Conteúdo de Portlandita livre para misturas com EAF (a) e EAF e lodo de ETA queimado (b) do estudo de El-Didamony, Khalil e Heikal (2014)<sup>9</sup>



(a)



(b)

Fonte: El-Didamony, Khalil e Heikal (2014, p. 75)

<sup>9</sup> Mix I: 100% cimento Portland comum (CP)

Mix II: 90% de CP + 10% de EAF

Mix III: 80% de CP + 20% de EAF

Mix IV: 70% de CP + 30% de EAF

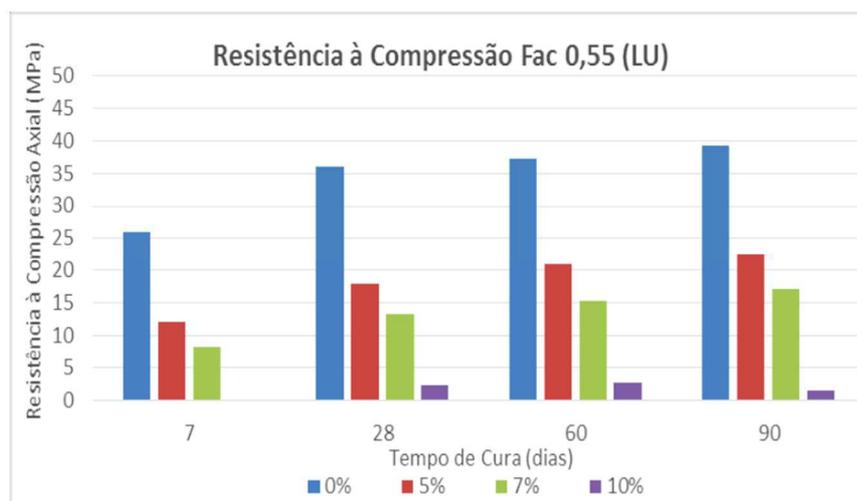
Mix V: 70% de CP + 25% de EAF + 5% lodo

Mix VI: 70% de CP + 20% de EAF + 10% lodo

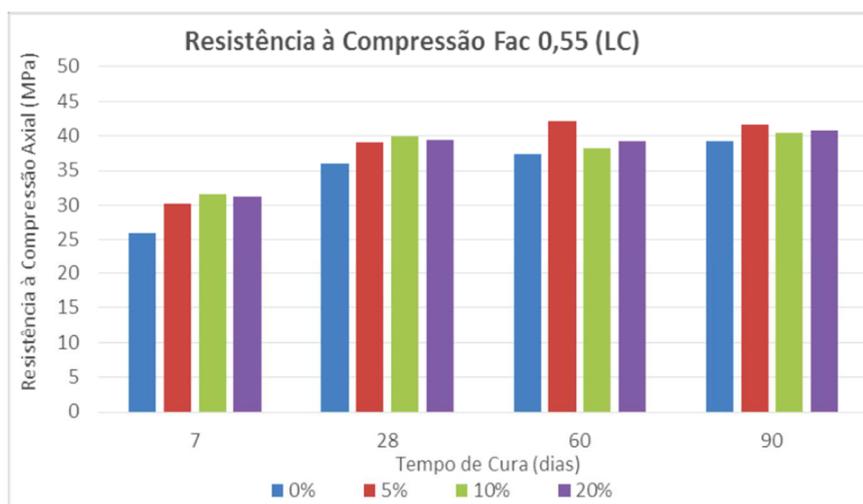
Mix VII: 70% de CP + 25% de EAF + 15% lodo.

Ramirez et al. (2015) avaliaram o desempenho de concretos com substituição de lodo de ETA úmido (5, 7 e 10%) e calcinado a temperatura de 700°C (5, 10 e 20%) em relação à massa da areia. Os autores observaram que os concretos com substituição de lodo úmido não apresentaram bons resultados, sendo que 5% de substituição provocou uma redução de 50% na resistência em relação ao concreto de referência, e 10% nem chega a conferir resistência ao concreto. Já a adição de lodo de ETA calcinado, em qualquer teor de substituição da areia, conferiu resistências próximas ou pouco mais elevadas que o concreto de referência, sendo que as melhores resistências foram obtidas para 5 e 10% de substituição.

Figura 24 - Resistência à compressão das misturas com lodo úmido (a) e lodo calcinado (b) estudadas por Ramirez et al. (2015).



(a)



(b)

Antolini (2015) investigou a influência do teor e do período de cura de misturas contendo diferentes teores de CLETA, CCA e EAF quanto a dois quesitos relativos à durabilidade das estruturas de concreto: retração total e penetração de cloretos. Os períodos de cura úmida foram de 3 e 7 dias, e os teores de substituição de cimento por CLETA foram de 0 a 30%, além de misturas ternárias (20% CLETA e 5% EAF; e 20% CLETA e 10% EAF) e uma quaternária (20% CLETA, 5% EAF e 5% de CCA). De acordo com os resultados obtidos pela autora, o período de cura não teve grande influência sobre os resultados de retração, embora esta tenha sido um pouco mais elevada com a cura de 3 dias. O teor de substituição de cimento por cinza de lodo de ETA apresentou influência sobre a retração, sendo os menores valores encontrados para a mistura de referência, sem adição. Para as misturas com adição, a retração aumentou conforme a proporção de substituição de cimento por CLETA aumentou, sendo menor para 5% e maior para 30%.

Além do uso em matrizes de concreto, outros usos foram estudados para o lodo de ETA. Devido às semelhanças de sua composição química e mineralógica com as argilas empregadas na fabricação de tijolo, Hegazy, Fouad e Hassanain (2012) investigaram a substituição desta por lodo com adições de CCA e sílica ativa (SA). Os autores concluíram que o lodo de ETA pode ser utilizado para fabricação de tijolos, desde que sejam acrescentadas adições com alto teor de sílica, como CCA e SA, e que temperaturas de queima mais elevadas sejam empregadas.

Chen, Ma e Dai (2010) estudaram a viabilidade do uso de lodo de ETA como substituição parcial de matéria-prima silicosa na produção do clínquer. As substituições foram de 4 a 10% de lodo de ETA. Seis amostras foram aquecidas a 1400°C durante 40 minutos e depois moídas. Da análise da capacidade de combinação da cal livre durante o processo térmico, os autores notaram que há uma redução do conteúdo de CaO livre nas misturas com adição de lodo de ETA, sendo que esta redução ocorre mais rapidamente para teores de até 5,5 % de substituição. Os ensaios de DRX mostram um aumento da quantidade de C<sub>3</sub>S no clínquer produzido. Segundo os autores, a presença e a concentração de elementos menores como Cr, Zn, Cu, Ni, Na, K etc no estado bruto interferiram no efeito do lodo, já que alguns desses elementos podem estar relacionados com a formação do C<sub>3</sub>S. Por meio da análise dos lixiviados do concreto, os autores notaram que os metais pesados como Cr, Cu, Ni, Pb e Zn, que eram registrados no lodo em estado bruto, foram quase totalmente incorporados pelo clínquer. Quanto à resistência à compressão, para as

idades de 3 e 7 dias, substituições de 10% apresentaram resultados positivos. No entanto, aos 28 dias somente o teor de 7% de substituição apresentou resultados satisfatórios. Portanto, foi constatado a necessidade de investigação de um teor ótimo de substituição para o lodo empregado.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada nesta pesquisa teve como finalidade avaliar a influência da cinza de lodo de estação de tratamento de água (CLETA) nas propriedades elétricas do concreto, especialmente a resistividade elétrica. Além da CLETA, calcário moído também foi empregado como substituição parcial do cimento em algumas amostras.

O teor de cada adição empregada na pesquisa foi definido por meio de um planejamento experimental estatístico. Por meio deste planejamento também foram definidas as relações água/aglomerante (a/agl) a serem empregadas nos traços de concreto e pasta.

Além dos traços definidos por meio do planejamento experimental, traços de referência, contendo apenas cimento Portland CPV-ARI, foram moldados para fins de comparação.

Os ensaios de resistividade elétrica foram feitos em corpos de prova de concreto, e os de condutividade elétrica e de potencial de hidrogênio (pH), em pastas. Estes ensaios foram feitos no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), anexo ao Centro de Tecnologia (CT), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

### 4.1.1 Variáveis da pesquisa

Para se alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa, primeiramente foram definidas quais as variáveis envolvidas na pesquisa:

4.1.1.1 Variáveis independentes: são diretamente ligadas à constituição do concreto em si, possuindo influência sobre sua microestrutura.

- Relação água/aglomerante (a/agl): definida de acordo com planejamento experimental;
- Idade da realização dos ensaios:
  - Resistividade elétrica aparente: 7, 14, 28, 56 e 91 dias;
  - Condutividade elétrica e pH da solução aquosa dos poros: 7, 28 e 91 dias.

4.1.1.2 Variáveis intervenientes: podem alterar as propriedades do material cimentante:

- Tipo de adição mineral:
  - Cinza de lodo de estação de tratamento de água (CLETA);
  - Calcário moído.
- Teor de substituição: definido de acordo com planejamento experimental;

4.1.1.3 Variáveis dependentes: dependem das demais variáveis para serem determinadas:

- Em concreto: Resistividade elétrica aparente.
- Em pasta:
  - Condutividade elétrica da solução aquosa dos poros;
  - Potencial de Hidrogênio (pH) e concentração de íons  $\text{OH}^-$  da solução aquosa dos poros.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 4.2.1 Agregados

O agregado graúdo empregado na pesquisa foi de origem basáltica, britado, proveniente do município de Itaara - RS. Foi lavado, para remoção das impurezas que poderiam interferir na qualidade do concreto, e seco ao ar, para remoção da umidade.

O agregado miúdo utilizado foi areia natural quartzosa, da região do município de Santa Maria – RS. Também foi lavado afim de remover as impurezas que poderiam prejudicar a qualidade do concreto. Depois de lavado foi seco em estufa a uma temperatura na faixa de 105 a 110 °C para remoção da umidade.

Os ensaios para caracterização dos agregados foram realizados de acordo com as seguintes normas técnicas:

- NBR NM 26 (2009): Agregados – Amostragem;
- NBR NM 45 (2006): Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios;
- NBR NM 52 (2009): Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente

- NBR NM 53 (2009): Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água
- NBR NM 248 (2003): Agregados - Determinação da composição granulométrica;
- NBR 7809 (2006): Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.

Na Tabela 2 são apresentas as características físicas dos agregados empregados nesta pesquisa e, nas Figuras 25 e 26 suas distribuições granulométricas.

Tabela 2 - Características físicas dos agregados.

Grandeza Física	Areia	Brita
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,64	2,52
Massa unitária solta (kg/dm <sup>3</sup> )	1,50	1,42
Módulo de finura	2,10	6,97
Dimensão máxima característica (mm)	1,20	19,00
Índice de forma	-	1,55
Absorção de água (%)	-	1,65

Figura 25 - Curva granulométrica da areia.

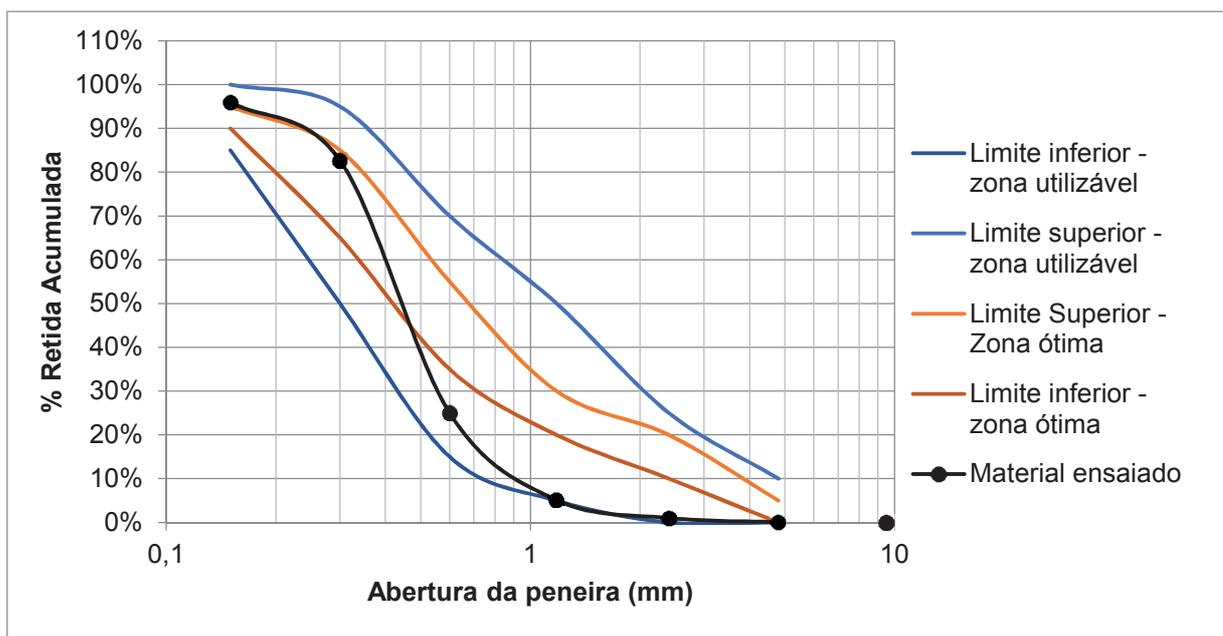
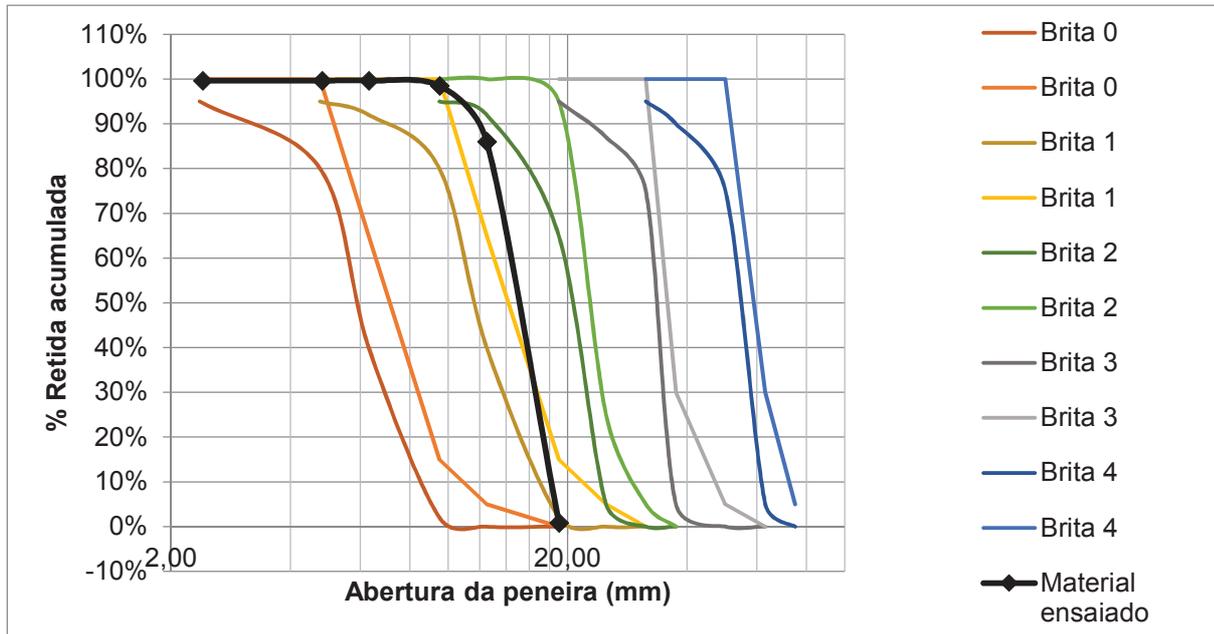


Figura 26 – Curva granulométrica da brita.



#### 4.2.2 Cimento Portland e adições minerais

Foi empregado nesta pesquisa o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI), e as adições minerais foram o calcário moído e a cinza de lodo de ETA (CLETA). O cimento é de origem nacional e está de acordo com a NBR 5733 (ABNT, 1991). O calcário utilizado neste trabalho, de origem calcítica, foi fornecido por uma fábrica de cimento que utiliza este material da mesma forma que foi empregado neste estudo como adição mineral. A CLETA foi preparada a partir do lodo de ETA proveniente da Estação de Tratamento de Água de Santa Maria, sob responsabilidade da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN).

O lodo *in natura* foi primeiramente seco em estufa a uma temperatura variando entre 105 a 110 °C para remoção da umidade e, depois disso, destorroado em um moinho de mandíbulas. Este material foi então calcinado a uma temperatura de 700°C durante 1 hora em uma mufla, com taxa de aquecimento constante de 10°C/min. A mufla era dotada de uma abertura, que facilitava a entrada de ar para a oxidação da matéria orgânica do lodo *in natura*. Após a calcinação, o lodo foi moído em um moinho de bolas também durante 1 hora. Depois da moagem, quantidade suficiente de material foi homogeneizado para as moldagens de concreto e pasta.

A temperatura e o tempo de permanência de calcinação, bem como o tempo de moagem do lodo foram definidos por meio de um estudo que ocorre simultaneamente a este, conduzido pela doutoranda Sabrina Hagemann (pertencente ao grupo de pesquisas GEPECON). Neste estudo foi analisada a atividade pozolânica das CLETAS pelo ensaio de Índice de Desempenho, realizado de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014).

As normas técnicas citadas abaixo foram empregadas para caracterizar o cimento e as adições minerais empregados nesta pesquisa:

- NBR 11579 (ABNT, 2012): Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200);
- Análise química:
  - NBR NM 10 (ABNT, 2012), NBR NM 11-1 (ABNT, 2012), NBR NM 12 (ABNT, 2012), NBR NM 13 (ABNT, 2013), NBR NM 14 (ABNT, 2012), NBR NM 15 (ABNT, 2012), NBR NM 16 (ABNT, 2012), NBR NM 17 (ABNT, 2012), NBR NM 18 (ABNT, 2012), NBR NM 19 (ABNT, 2012), NBR NM 21 (ABNT, 2012)
- NBR NM 23 (ANBT, 2001): Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica;
- NBR NM 43 (ABNT, 2003): Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal;
- NBR NM 65 (ABNT, 2003): Cimento Portland - Determinação do tempo de pega;
- NBR 7215 (ABNT, 1997): Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão;
- NBR 11579 (ABNT, 2012): Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200);
- NBR 15894-3 (ABNT, 2010): Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45  $\mu\text{m}$ ;
- NBR 15895 (ABNT, 2010): Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado.

A distribuição granulométrica do aglomerante e das adições minerais foi apresentada na Figura 27, e na Tabela 3, suas características físicas.

Figura 27 - Distribuição granulométrica a laser do cimento Portland e das adições minerais.

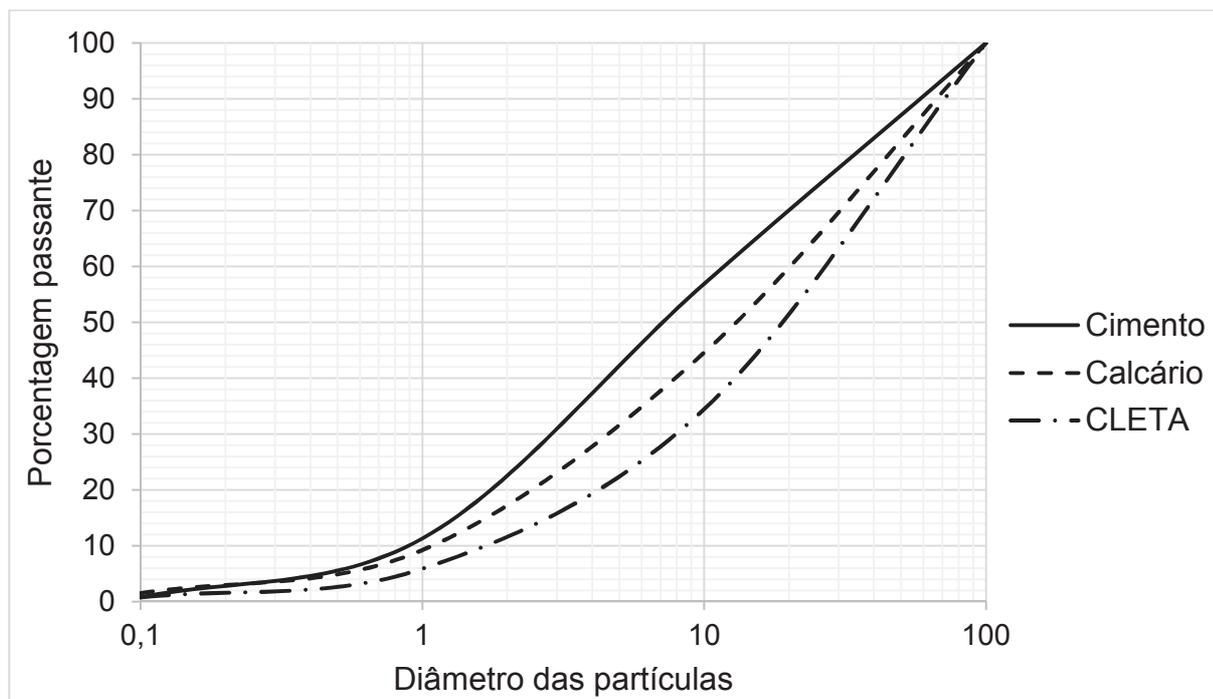


Tabela 3 - Características físicas do cimento Portland e das adições minerais.

Grandeza Física	CP V - ARI	CLETA	Calcário
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,10	2,56	2,76
Área específica BET (m <sup>2</sup> /g)	2,12	46,94	11,82
Resíduo na #45 μm (%)	0,60	15,60	18,26
Resíduo na #75 μm (%)	0,72	6,82	8,10

A Tabela 4 apresenta a caracterização mecânica do cimento, notando-se conformidade com os limites apresentados pela NBR 5733 (ABNT, 1991).

A Tabela 5 apresenta a composição química do cimento, das adições minerais e do lodo *in natura* empregados na pesquisa. Pode-se observar que a soma dos constituintes SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para o lodo *in natura* é de 62,59% e para a CLETA, de 89,46%. A CLETA pode, então, ser considerada material pozolânico de acordo com

a NBR 12653 (ABNT, 2015), a qual especifica um limite mínimo de 70% para a soma de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Tabela 4 - Caracterização mecânica do cimento conforme NBR 5733 (ABNT, 1991)

<b>Resistência à compressão axial (MPa)</b>		
Idade	Valor observado	Limite
1 dia	14,46	≥14
3 dias	32,17	≥24
7 dias	34,80	<b>≥34</b>
28 dias	43,87	
<b>Tempo de pega</b>		
	Tempo observado	Limite
Início de pega	220 min (3,7h)	≥ 1 h
Fim de pega	290 min (4,8h)	≤ 10 h

Tabela 5 - Composição química do cimento Portland, do calcário, e do lodo calcinado e in natura.

<b>Componentes</b>	<b>Porcentagem em massa dos materiais (%)</b>			
	CP V - ARI	Calcário	CLETA	Lodo in natura
$\text{SiO}_2$	16,60	8,81	42,73	29,90
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3,39	1,93	34,73	24,30
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,30	1,31	11,99	8,39
CaO	64,90	44,30	0,36	0,25
MgO	2,52	6,02	0,61	0,43
$\text{SO}_3$	4,03	0,07	1,06	0,74
$\text{Na}_2\text{O}^{10}$	0,06	0,14	0,12	0,08
$\text{K}_2\text{O}^{10}$	1,26	0,49	0,92	0,64
MnO	0,06	0,06	0,42	0,30
$\text{TiO}_2$	0,19	0,11	0,71	0,50
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,14	0,05	0,69	0,48
Outros óxidos	0,29	0,01	0,47	0,33
Perda ao fogo	3,26	36,70	5,18	33,70

Quanto à perda ao fogo, o lodo *in natura* apresentou um teor de 33,70% e o lodo calcinado, de 5,18%. Em relação ao teor de álcalis disponíveis, o primeiro

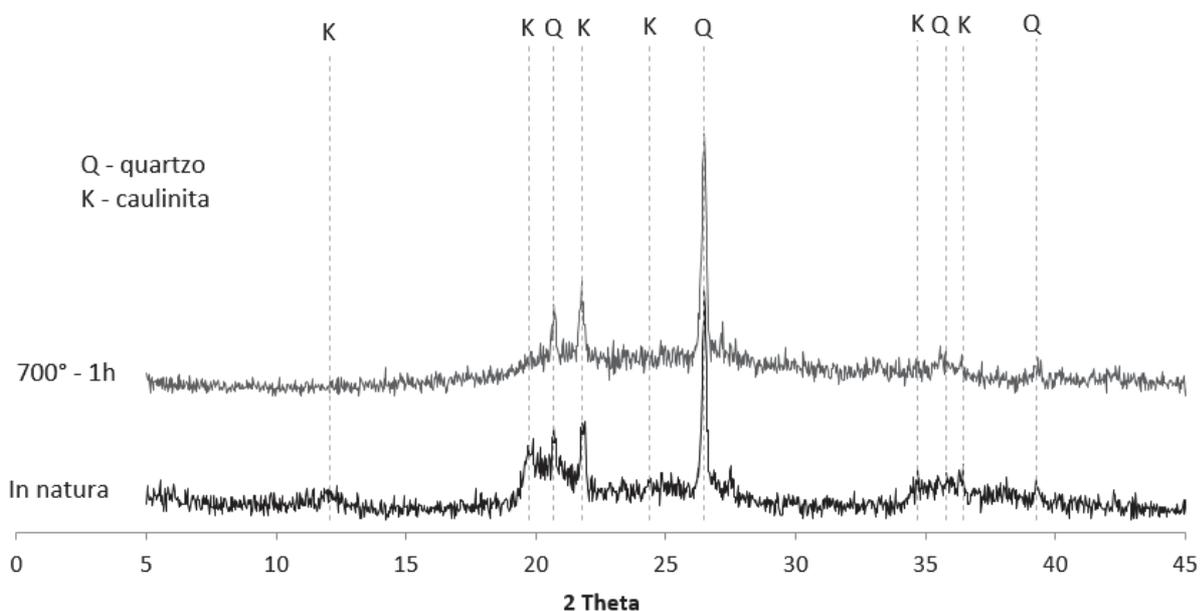
<sup>10</sup> Álcalis do cimento.

apresenta um somatório de 0,72% e o segundo, de 1,04%. Desse modo, a CLETA também atende a NBR 12653 (ABNT, 2015) nestes quesitos, a qual limita a perda ao fogo a um teor de 10% e o teor de álcalis, a 1,5%.

A partir do ensaio de Chappelle modificado, realizado de acordo com a NBR 15895 (ABNT, 2010), a quantidade de hidróxido de cálcio fixado (ou consumido), por grama de material pozolânico, foi de 1270 mg de  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  de amostra de CLETA. O material foi então considerado pozolânico, já que o limite mínimo estabelecido pela NBR 15894-1 (ABNT, 2010), norma técnica que trata dos requisitos para o uso do metacaulim com cimento Portland, é 750 mg  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  de metacaulim.

Os difratogramas de raios-X das amostras de lodo *in natura* e calcinado são apresentados na Figura 28. A partir deles, pode-se observar que a composição mineralógica principal de ambos é quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ).

Figura 28 – Difratogramas de raios-X das amostras de lodo *in natura* e calcinado.



As análises termodiferenciais e termogravimétricas permitiram determinar quais as reações que ocorreram na amostra analisada, em comparação com um padrão, quando aquecidos até a temperatura de 1000°C a uma taxa de aquecimento de 10°C/min. Na Tabela 6 são apresentados os intervalos de temperatura que ocorrem as reações (endotérmicas ou exotérmicas) da amostra de lodo calcinado analisado, indicando que a perda de massa devido à oxidação da matéria orgânica (carbono)

ocorreu entre 300 e 370°C, processo esse caracterizado por uma reação exotérmica. Além disso, por meio das análises termogravimétricas o teor de caulinita encontrado para a amostra de lodo estudada foi em torno de 50%.

Tanto os ensaios de difração de raio-x quanto os de análise termodiferencial e termogravimétrica foram realizados pelo Laboratório de Mineralogia da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

Tabela 6 – Caracterização por análises termodiferencial e termogravimétrica do lodo calcinado.

<b>Temperatura do pico (°C)</b>	<b>Natureza da reação</b>	<b>Interpretação</b>
153	Endotérmica	Perda de água livre e/ou adsorvida
300 a 370	Exotérmica	Oxidação da matéria orgânica
470 a 510	Endotérmica	Desisdroxilação dos argilominerais

#### **4.2.3 Aditivos**

Um aditivo químico plastificante de pega normal foi empregado nas misturas para a obtenção de um abatimento de  $100\pm 20$ mm. Para isso, a dosagem variou de 0,2 a 1,0% da massa total de cimento e adições minerais, de acordo com recomendação do fabricante.

Nos traços em que o abatimento desejado não foi obtido com a porcentagem máxima de aditivo plastificante, um aditivo superplastificante foi empregado em complemento àquele, com dosagem recomendada pelo fabricante variando de 0,2 a 5,0% em massa total de cimento e adições minerais.

#### **4.2.4 Água**

A água utilizada nas moldagens de concreto e pasta foi proveniente de poços artesianos que abastecem todo o campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), armazenados em reservatórios. Água deionizada foi utilizada nos ensaios de condutividade elétrica para a limpeza dos equipamentos, vidrarias e para o ensaio propriamente dito.

### 4.3 DOSAGEM DOS CONCRETOS

A dosagem inicial dos concretos seguiu o procedimento indicado por Helene e Terzian (1992), sendo feitas diversas moldagens experimentais com variação no teor de argamassa e na proporção entre cimento e agregados. O teor ótimo de argamassa foi mantido em 51%. Na Tabela 7 são apresentados os três traços do concreto de referência para diferentes relações a/agl. Nos traços binários ou ternários, uma compensação no teor de agregado miúdo foi necessária para manter o percentual de argamassa constante para todas as misturas, já que as massas específicas da CLETA e do calcário eram menores que aquela do cimento Portland.

Tabela 7 - Traços unitários empregados na dosagem dos concretos de referência.

<b>Relação água/aglomerante</b>	<b>Traço unitário</b>
0,35	1 : 1,35 : 2,25
0,50	1 : 2,11 : 2,99
0,65	1 : 2,88 : 3,72

Depois de definidos os traços de referência que seriam empregados no estudo, a definição dos demais traços seguiram um planejamento experimental estatístico do tipo Planejamento Rotativo Composto Central<sup>11</sup> (PRCC), sendo esse um esquema fatorial. De maneira geral, um planejamento serve para a definição das misturas e otimização do número de experimentos. Experimentos criados em esquemas fatoriais visam avaliar a influência da combinação entre níveis de dois ou mais fatores sobre uma variável de resposta. Como os esquemas fatoriais são considerados projetos de tratamento e não projetos experimentais, cada combinação é considerada um tratamento. Se um experimento contém um número de k fatores, cada um com N níveis, então se tem um projeto fatorial completo com  $N^k$  tratamentos. Caso vários níveis diferentes de cada fator forem analisados, este experimento terá então um número de testes que cresce exponencialmente, o que pode invalidar o uso de projetos fatoriais completos. Uma maneira de atenuar este problema é o uso de fatoriais  $2^k$ . Desse modo, k fatores são avaliados, cada um com 2 níveis, um mínimo e um máximo. Pontos centrais e axiais podem ser adicionados a este modelo afim de

<sup>11</sup> Minha tradução para *central composite rotatable design* (CCRD)

se avaliar a repetitividade do processo, estimar erros e verificar o ajuste dos resultados a um modelo de segunda ordem. (RODRIGUES; IEMMA, 2015).

No presente estudo foi empregado um PRCC com  $2^K$  pontos fatoriais, 2k pontos axiais e 3 pontos centrais, totalizando 17 tratamentos. Os fatores considerados foram  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , sendo equivalentes, respectivamente, ao teor de CLETA, ao teor de calcário e à relação a/agl. O teor de CLETA variou de 0 a 30%, o de calcário de 0 a 15% e a relação a/agl teve como limite inferior 0,35 e superior 0,65. O planejamento experimental é apresentado na Tabela 8, sendo  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  os valores codificados dos valores principais e intermediários (pontos fatoriais, axiais e centrais) das variáveis analisadas. Nesta mesma tabela também estão contidas as informações sobre quantidade de areia e brita para cada traço do PRCC, e também 3 traços de referência (REF) contendo apenas cimento Portland CPV-ARI, que foram moldados para fins de comparação.

Tabela 8 - Traços do planejamento experimental e de referência.

Traço	$x_1$	$x_2$	$x_3$	CLETA (%)	Calcário (%)	Relação a/agl	Areia	Brita
REF 0,35	-	-	-	0	0	0,35	1,35	2,25
REF 0,50	-	-	-	0	0	0,50	2,11	2,99
REF 0,65	-	-	-	0	0	0,65	2,88	3,72
1	-1	-1	-1	6,0	3,0	0,41	1,65	2,55
2	1	-1	-1	23,9	3,0	0,41	1,65	2,55
3	1	1	-1	23,9	12,0	0,41	1,65	2,55
4	-1	1	-1	6,1	12,0	0,41	1,65	2,55
5	-1	-1	1	6,1	3,0	0,59	2,57	3,43
6	1	-1	1	23,9	3,0	0,59	2,57	3,43
7	1	1	1	23,9	12,0	0,59	2,57	3,43
8	-1	1	1	6,1	12,0	0,59	2,57	3,43
9	-1,681	0	0	0,0	7,5	0,50	2,11	2,99
10	1,681	0	0	30,0	7,5	0,50	2,11	2,99
11	0	-1,681	0	15,0	0,0	0,50	2,11	2,99
12	0	1,681	0	15,0	15,0	0,50	2,11	2,99
13	0	0	-1,681	15,0	7,5	0,35	1,35	2,25
14	0	0	1,681	15,0	7,5	0,65	2,88	3,72
15	0	0	0	15,0	7,5	0,50	2,11	2,99
16	0	0	0	15,0	7,5	0,50	2,11	2,99
17	0	0	0	15,0	7,5	0,50	2,11	2,99

A partir dos traços apresentados na Tabela 8 pode-se calcular o consumo de materiais para cada traço, que está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Consumo de materiais por m<sup>3</sup> de concreto.

Traço	Materiais em kg/m <sup>3</sup>								
	Agl.	CP	CLETA	Calcário	Areia	Brita	Água	Plast.	Super.
REF 0,35	481,51	481,51	0,00	0,00	650,04	1083,40	168,53	-	-
REF 0,50	356,08	356,08	0,00	0,00	751,34	1064,69	178,04	-	-
REF 0,65	282,51	282,51	0,00	0,00	813,63	1050,94	183,63	-	-
1	422,03	383,63	25,74	12,66	690,40	1076,18	173,03	2,31	-
2	422,03	308,51	100,87	12,66	676,91	1076,18	173,03	4,03	3,54
3	422,03	270,52	100,87	50,64	672,92	1076,18	173,03	4,13	2,88
4	422,03	345,64	25,74	50,64	686,42	1076,18	173,03	2,07	-
5	307,96	279,94	18,79	9,24	787,11	1056,30	181,70	-	-
6	307,96	225,12	73,60	9,24	777,27	1056,30	181,70	2,02	-
7	307,96	197,40	73,60	36,96	774,36	1056,30	181,70	3,03	0,77
8	307,96	252,22	18,79	36,96	784,21	1056,30	181,70	-	-
9	356,08	329,38	0,00	26,71	748,53	1064,69	178,04	-	-
10	356,08	222,55	106,83	26,71	729,34	1064,69	178,04	3,73	1,90
11	356,08	302,67	53,41	0,00	741,74	1064,69	178,04	3,54	-
12	356,08	249,26	53,41	53,41	736,14	1064,69	178,04	3,29	-
13	481,51	373,17	72,23	36,11	633,27	1083,40	168,53	4,64	3,24
14	282,51	218,95	42,38	21,19	803,80	1050,94	183,63	1,01	-
15	356,08	275,96	53,41	26,71	738,94	1064,69	178,04	2,73	-
16	356,08	275,96	53,41	26,71	738,94	1064,69	178,04	2,73	-
17	356,08	275,96	53,41	26,71	738,94	1064,69	178,04	2,73	-

#### 4.4 DOSAGEM DAS PASTAS

As pastas foram moldadas seguindo o mesmo princípio experimental dos concretos empregando, no entanto, somente cimento Portland, CLETA, calcário, água e aditivos, nas mesmas proporções dos traços de concreto.

#### 4.5 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Os concretos moldados segundo a dosagem apresentada no item 4.3 serviram para o ensaio de resistividade elétrica. As pastas moldadas conforme item 4.4 foram empregadas para os ensaios de condutividade elétrica e de pH. Os corpos de prova para os ensaios em concreto possuíam as dimensões de  $\varnothing 10 \times 20 \text{cm}$  e, para os ensaios em pastas,  $\varnothing 5 \times 10 \text{cm}$ .

A consistência fixada para todos os traços foi de  $100 \pm 20 \text{mm}$ , medido por meio do ensaio de tronco de cone, de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998). O adensamento nas moldagens de concreto foi feito com um vibrador mecânico portátil, em camada única, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015).

A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi a mesma daquela adotada por Hoppe (2005):

1. 100% do agregado graúdo + 60% da água. Duração da mistura: 1min;
2. 100% do aglomerante, previamente homogeneizado + 100% dos aditivos (teores definidos por meio de estudos prévios) + 20% da água. Duração da mistura: 1min (ou até haver homogeneização dos materiais);
3. 100% do agregado miúdo + 20% da água. Duração da mistura: 3min.

A temperatura do concreto foi fixada em  $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ . Os aglomerantes e os agregados foram mantidos desde o dia anterior à moldagem sob temperatura controlada, sendo necessário ajuste da temperatura da água no momento da moldagem de acordo com a Equação 6 proposta por Mehta e Monteiro (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

$$T = \frac{0,22 (T_m M_m + T_c M_c) + T_a M_a}{0,22 (M_m + M_c) + M_a} \quad (6)$$

Onde:

- T é a temperatura da massa de concreto, em  $^\circ\text{C}$ ;
- $T_m$  é a temperatura dos agregados, em  $^\circ\text{C}$ ;
- $T_c$  é a temperatura do aglomerante, em  $^\circ\text{C}$ ;
- $T_a$  é a temperatura da água, em  $^\circ\text{C}$ ;

- $M_m$  é a massa de agregados, em kg;
- $M_c$  é a massa de aglomerante, em kg;
- $M_a$  é a massa de água, em kg.

Para a moldagem dos corpos de prova de pasta os materiais também foram mantidos sob temperatura constante desde o dia anterior e a moldagem foi feita com agitador mecânico. Inicialmente foram misturados a água e os aditivos, quando este era necessário. O cimento e as adições minerais foram misturados lentamente afim de evitar aglomeração. Depois disso a pasta foi misturada em rotação constante por 60 segundos, pausado para limpar as paredes do recipiente, e misturado por mais 90 segundos. Não houve adensamento das pastas depois de colocadas aos moldes.

O procedimento de cura foi o indicado pela NBR 5738 (ABNT, 2015), sendo que os corpos de prova, de concreto e de pastas, foram mantidos nos moldes durante 24 horas, devidamente cobertos para evitar perda de umidade para o meio. Após a desmoldagem, os CP's ficaram armazenados até a idade do ensaio em câmara úmida à temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar acima de 95%. Os CP's destinados aos ensaios de resistividade retornaram para a câmara úmida logo após o ensaio, por ser feito de maneira não destrutiva.

## 4.6 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

### 4.6.1 Resistividade elétrica aparente

A resistividade elétrica aparente (REA) dos concretos foi medida aos 7, 14, 28, 56 e 91 dias. Os corpos de prova permaneceram na câmara úmida até o momento do ensaio para não haver perda de umidade.

As medições foram feitas com o aparelho comercial da marca CNS Farnell Limited, RM MK II, modelo U95. Este equipamento mede a resistividade elétrica do concreto por meio de sondas com pontas de madeira, que devem ser mantidos saturados durante o ensaio. Os eletrodos são ajustáveis, sendo então configurados de maneira equidistantes, de acordo com o método de Wenner. Para esta pesquisa, o afastamento entre as sondas ( $a$ ) foi de 2,5 cm.

Os corpos de prova de concreto, logo após a desmoldagem, receberam a devida identificação e também marcas na lateral, a cada  $90^\circ$ , conforme a Figura 29.

Essas marcações possibilitaram que as medidas fossem feitas o mais próximo possível do lugar em que havia sido feita a medição na idade anterior, a 0, 90, 180 e 270°. Além disso, a sonda foi posicionada a 0 e a 180° na lateral do corpo de prova, conforme Figura 30, totalizando 8 medições em cada um dos 6 corpos de prova para cada traço. Este procedimento de identificação e medição é indicado no método FM 5-578, descrito por Florida Department of Transportation (2004), atualmente sob consideração da American Association Of State Highway Transportation Officials (2010).

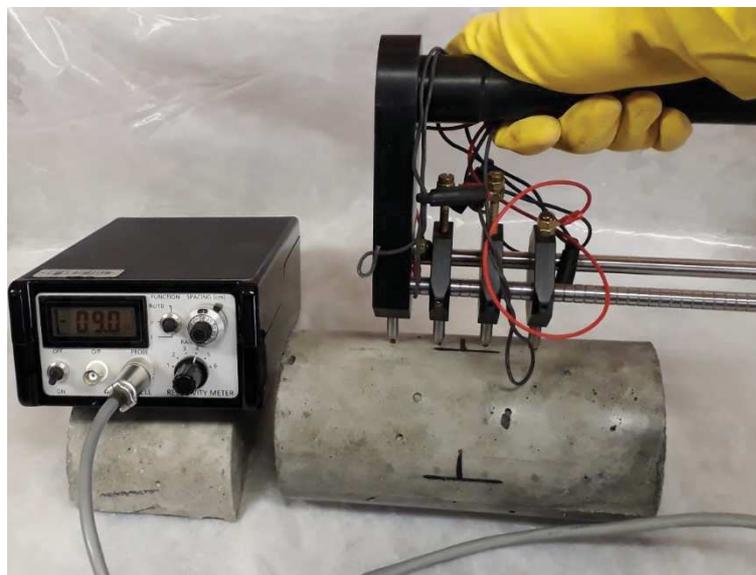
Figura 29 - Marcação feita nos corpos de prova para as medições de resistividade elétrica.



Fonte: Acervo do autor

A correção dos valores de resistividade obtidos nas medições com este equipamento foi feita de acordo com a metodologia proposta por Morris, Moreno e Sagüés (1996), sendo o fator de correção  $K=1,41$ . A média dos valores de resistividade medidos pelo equipamento ( $\rho_{eq}$ ) foi então dividida pelo fator  $K$ , obtendo-se o valor da resistividade elétrica real ( $\rho_{real}$ ) para cada idade.

Figura 30 – Medições de resistividade elétrica feitas com o equipamento comercial empregado na pesquisa.



Fonte: Acervo do autor

#### 4.6.2 Condutividade elétrica e potencial de Hidrogênio (pH)

Os ensaios foram realizados em pasta endurecida, nas idades de 7, 28 e 91 dias. Os corpos de prova das pastas possuíam dimensões de  $\varnothing 5 \times 10 \text{cm}$  e foram mantidos em reservatório com água com cal mantida em câmara úmida até a idade dos ensaios.

Antes de cada ensaio a amostra foi lixada e lavada com água corrente, afim de retirar eventuais fontes de contaminação da superfície externa. A pasta endurecida foi moída e o pó resultante foi peneirado em peneira de malha #100. O pó passante foi misturado, na proporção 1:1, com água deionizada afim de produzir uma solução aquosa. Três amostras para cada traço foram feitas, sendo agitadas por uma hora em agitador magnético, conforme Figura 31, afim de ocorrer a estabilização do pH. Elas permaneceram cobertas com plástico durante esse processo, para evitar contaminação do meio.

A etapa seguinte foi a filtragem da mistura, resultando em uma solução incolor que permaneceu em um recipiente fechado até o momento do ensaio. A Figura 32 mostra o equipamento empregado neste ensaio, da marca Metler Toledo, modelo SevenExcellence. Um dos sensores determina a condutividade elétrica e outro o pH, sendo as medidas feitas simultaneamente na solução.

Figura 31 - Agitadores magnéticos para as soluções de cada traço.



Fonte: Acervo do autor

Figura 32 - Ensaio de condutividade elétrica e pH.



Fonte: Acervo do autor

O procedimento descrito acima foi utilizado em todas as misturas e relações a/agl investigadas e seus resultados foram comparados entre si.

Embora o equipamento indicado no procedimento sugerido por Longuet, Burglen e Zelwer (1973) e Barneyback e Diamond (1981) esteja disponível no LMCC, esse não foi adotado devido à dificuldade envolvida na extração da solução de poros de misturas com adições minerais e relação  $a/agl \leq 0,40$ .

Vale salientar que, de acordo com Xi, Siemer e Scheetz (1997), o efeito da diluição, dissolução e hidratação dos grãos anidros de cimento expostos durante o processo de moagem afeta o pH da solução e, dessa forma, o pH medido não é o pH real da solução dos poros, mas está relacionado a ele e fornece algumas informações sobre a alcalinidade da solução dos poros líquidos. Por fim, a partir dos dados de pH calculou-se a concentração do íon  $\text{OH}^-$ , sendo  $\text{pOH} = 14 - \text{pH} = -\log[\text{OH}^-]$ .

#### **4.6.3 Resistência à compressão axial**

Os ensaios de resistência mecânica foram realizados de acordo com as NBR 5738 (ABNT, 2015) e NBR 5739 (ABNT, 2007) nas idades de 7, 28 e 91 dias. Os corpos de prova foram mantidos sob cura úmida por 7 dias e, após esse período, foram conservados em uma sala climatizada a uma temperatura de  $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$  e UR de  $(75 \pm 2)\%$  até o dia do ensaio.

### **4.7 TRATAMENTO DOS RESULTADOS**

A análise dos resultados de resistividade elétrica quanto à influência das variáveis da pesquisa em cada idade (item 5.1.1) foi feita por meio da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), empregando o Software Statistica, versão 12, sendo a superfície de resposta a representação do modelo gerado pelos resultados experimentais. Segundo Montgomery e Runger (2003, p. 14–11, tradução nossa), a MSR “é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são úteis para modelagem e análise em aplicações em que uma resposta de interesse seja influenciada por várias variáveis e o objetivo seja otimizar essa resposta”.

Segundo Montgomery e Runger (2003), primeiramente deve-se encontrar uma aproximação adequada para a relação entre a variável dependente e aquelas independentes, que normalmente se dá por meio de um polinômio de baixa ordem. Para esta pesquisa, essa aproximação foi feita por meio de um polinômio de segunda ordem, com interação. Esta equação é formada por um fator independente, que é o

valor médio da variável dependente, e pelos coeficientes de regressão (CR), que indicam a mudança na medida da variável dependente quando ocorre mudança unitária nas variáveis independentes.

A hipótese nula ( $H_0$ ) adotada foi que os CR fossem nulos. Caso essa hipótese fosse rejeitada, então a hipótese alternativa ( $H_1$ ) seria considerada verdadeira, sendo os CR não nulos e, portanto, significativos. Para que o coeficiente de regressão de um certo fator analisado seja considerado significativo, o  $p_{\text{valor}}$  encontrado deve ser menor que o nível de significância ( $\alpha$ ) adotado. O  $p_{\text{valor}}$  é chamado probabilidade de significância ou o nível descritivo do teste, e é a probabilidade de que valores mais extremos ocorram para a variável do teste que os obtidos para a amostra de ensaio (já que é uma amostra, e não toda a população). O nível de significância  $\alpha$ , por sua vez, está relacionado com a probabilidade de se cometer um erro do tipo I (rejeitar  $H_0$  quando  $H_0$  for verdadeiro) e é previamente selecionado pelo pesquisador (RODRIGUES; IEMMA, 2015). Para esta pesquisa o nível de significância  $\alpha$  fixado foi de 10% ( $\alpha = 0,1$ ).

Para cada idade foram analisados os índices de resistividade elétrica ( $I_p$ ), o Diagrama de Pareto e os contornos da superfície de resposta da resistividade elétrica, caso fosse verificado um bom ajuste do modelo. A significância e a validade do modelo foram avaliadas por meio da análise de variância (ANOVA) e do valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), assim como feito em outras pesquisas (FURQUIM, 2006; HAJJAJI; MLEZA, 2014; SAMET; MNIF; CHAABOUNI, 2007).

Os  $I_p$ 's representam a relação entre os resultados das misturas com adição mineral e aqueles da mistura de referência, em igualdade de relação a/agl e idade. Já o diagrama de Pareto indica quais os fatores significativos para a resistividade elétrica em ordem decrescente, com indicação do efeito estimado de cada fator principal. O efeito de um fator corresponde à mudança produzida na variável de resposta a partir da mudança no nível deste fator. (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

As superfícies de resposta podem ser plotadas graficamente, sendo a variável dependente relacionada às variáveis independentes. É possível plotar os contornos da superfície de resposta, a fim de visualizar a forma da superfície, sendo que cada contorno representa uma altura particular da superfície de resposta (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). Nesta pesquisa foram gerados os contornos de superfície de resposta para as 5 idades analisadas. Para cada idade, os gráficos relacionam o teor de CLETA e calcário para as 5 relações a/agl. A legenda lateral dá uma ideia das

faixas de resistividade elétrica para as diferentes relações  $a/agl$  e teores de substituição.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste item são apresentados os resultados de resistividade elétrica, condutividade elétrica e potencial de Hidrogênio (pH). Inicialmente foi avaliado o comportamento destas propriedades com o aumento da idade e também qual a influência da CLETA, do calcário e da relação água/aglomerante sobre a resistividade elétrica em cada idade. Os resultados de resistividade elétrica, condutividade elétrica e concentração de íons  $\text{OH}^-$  (obtida a partir dos resultados de pH) foram comparados na idade de 91 dias.

Em seguida avaliou-se o risco de corrosão de acordo com o CEB 192. Essa avaliação foi feita primeiramente em relação aos traços do planejamento experimental. Em seguida, no que se refere à relação a/agl máxima para cada classe de agressividade ambiental estabelecidas pela NBR 12655 (ABNT, 2015). Por fim, para patamares de resistência a compressão axial de 30MPa, 40MPa, 50MPa, 60MPa e 70MPa.

### 5.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA VERSUS TEMPO

Por meio do resumo dos resultados de resistividade elétrica apresentado na Tabela 10 pode-se fazer uma análise preliminar da evolução da resistividade elétrica com o tempo. De maneira geral, todos os traços apresentaram aumento da resistividade elétrica com o aumento da idade de ensaio. Este comportamento condiz com os resultados de outros estudos (LÜBECK, 2008; MEDEIROS-JUNIOR; LIMA, 2016; PRESUEL-MORENO; WU; LIU, 2013; VAN NOORT; HUNGER; SPIESZ, 2016; ZUO; WEI, 2015). De acordo com Medeiros-Junior e Lima (2016), esse aumento da resistividade elétrica com o tempo deve-se à hidratação do cimento e ao endurecimento progressivo do concreto. Durante a evolução do processo de hidratação, os íons que foram dissolvidos dos grãos de cimento reagem para a formar produtos de hidratação, o que tende a reduzir a condutividade da solução aquosa dos poros e aumentar o teor de sólidos, segmentando os poros capilares.

Tabela 10 – Resistividade elétrica aparente corrigida dos traços do planejamento experimental.

Traço	Variáveis			Resistividade elétrica aparente corrigida - $\rho$ ( $\Omega.m$ )				
	CLETA (%)	Calcário (%)	Relação a/agl	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	91 dias
REF 0,35	0,0	0,0	0,35	64,63	73,88	93,06	109,19	115,22
REF 0,50	0,0	0,0	0,50	62,35	71,10	81,06	92,26	100,27
REF 0,65	0,0	0,0	0,65	54,56	62,15	69,00	72,37	76,89
1	6,1	3,0	0,41	53,61	70,60	87,47	95,89	106,83
2	23,9	3,0	0,41	23,55	47,99	96,72	146,39	177,78
3	23,9	12,0	0,41	18,20	43,09	91,61	152,04	204,05
4	6,1	12,0	0,41	52,22	69,18	83,22	103,61	116,28
5	6,1	3,0	0,59	43,29	52,38	64,30	71,10	78,52
6	23,9	3,0	0,59	24,10	42,54	66,99	72,70	80,56
7	23,9	12,0	0,59	22,10	50,77	82,27	106,44	130,67
8	6,1	12,0	0,59	48,08	56,21	69,06	78,75	79,79
9	0,0	7,5	0,50	56,41	68,71	78,04	83,54	85,22
10	30,0	7,5	0,50	19,95	28,52	60,99	92,23	124,85
11	15,0	0,0	0,50	34,90	53,84	75,00	84,07	87,00
12	15,0	15,0	0,50	39,54	67,20	92,17	110,40	112,17
13	15,0	7,5	0,35	46,69	82,33	131,68	166,64	213,03
14	15,0	7,5	0,65	41,19	68,20	91,40	98,14	103,19
15	15,0	7,5	0,50	43,68	78,20	114,39	124,35	139,45
16	15,0	7,5	0,50	45,83	74,29	104,40	125,50	136,88
17	15,0	7,5	0,50	44,47	76,74	105,02	124,08	138,33

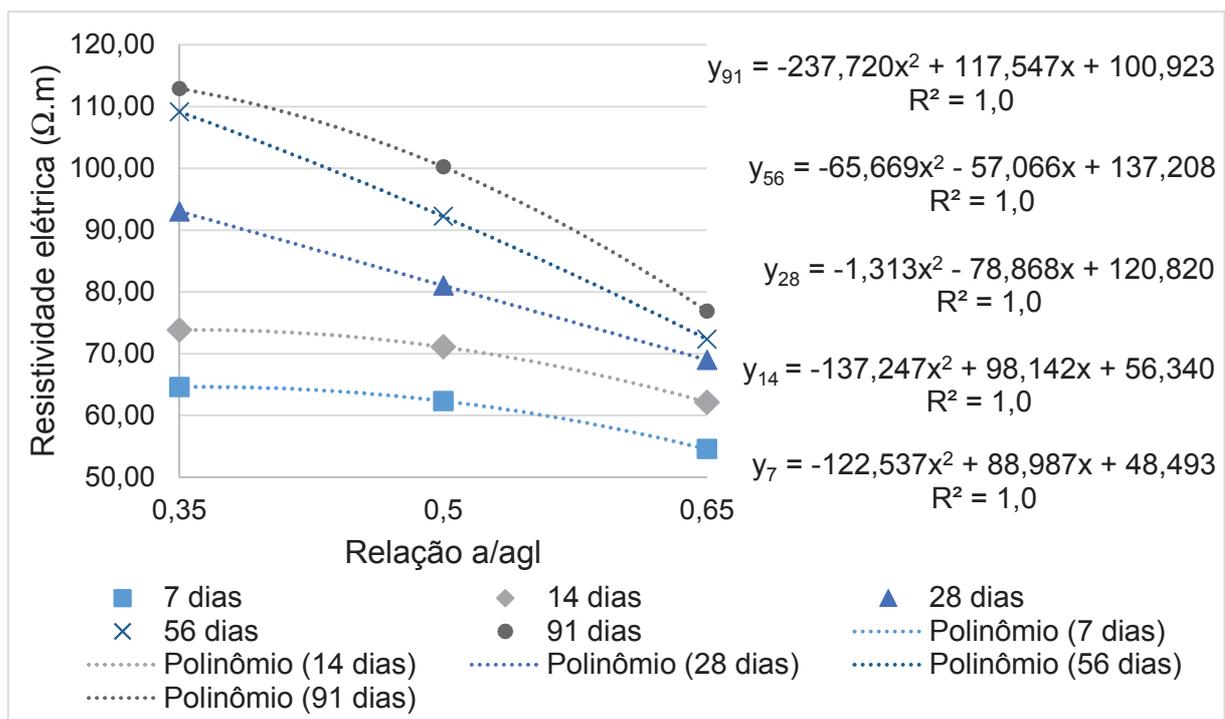
A evolução da resistividade elétrica, no entanto, não ocorreu de forma uniforme para todos os traços. Por meio da análise feita no item 5.1.1 buscou-se entender a influência de cada uma das variáveis da pesquisa (CLETA, calcário e relação água/aglomerante) em cada idade de ensaio. Ademais, no item 5.1.2 foi feita uma breve avaliação do comportamento da condutividade, do potencial de Hidrogênio (pH) e da concentração de íons  $\text{OH}^-$ , para fins de comparação com os resultados de resistividade elétrica.

### 5.1.1 Influência das variáveis da pesquisa na resistividade elétrica em cada idade

A avaliação da influência das variáveis da pesquisa na resistividade elétrica em cada idade de ensaio foi feita por meio do diagrama de Pareto, dos contornos das superfícies de resposta para cada relação a/agl e dos índices de resistividade elétrica ( $I_p$ ). As superfícies de respostas foram geradas após avaliação da significância e da validade do modelo, por meio da análise de variância (ANOVA) e do valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e levaram em consideração todos os fatores, embora com efeito estimado menor (não considerado significativo no diagrama de Pareto). As equações dos modelos são apresentadas também neste item.

Os valores de resistividade elétrica dos traços de referência das relações a/agl 0,41 e 0,59 apresentados nas tabelas de resistividade elétrica, para cada idade, foram calculados por meio das equações polinomiais apresentadas na Figura 33. Estas equações foram obtidas a partir dos dados experimentais dos traços de referência de relações a/agl 0,35; 0,50 e 0,65.

Figura 33 - Equações polinomiais de resistividade elétrica para os traços de referência.



x (nas equações): relação água/aglomerante.

## 5.1.1.1 7 dias

A partir dos dados experimentais de resistividade elétrica aos 7 dias apresentados na Tabela 10, procurou-se ajustar um modelo matemático para melhor analisar o comportamento conjunto das variáveis estudadas. Tendo em vista os dados da Tabela 11, o nível de significância de 0,0003 sugere que as variáveis representadas no modelo relacionam-se com nível de confiança de 99,97% e o valor do  $R^2$  indicou que o modelo respondeu por cerca de 96,48% da variabilidade na resistividade elétrica aos 7 dias. A partir do diagrama de Pareto<sup>12</sup> e dos contornos de superfície de resposta foram avaliados, então, quais variáveis da pesquisa tiveram maior influência sobre a variável de resposta nesta idade.

Tabela 11 - Análise de variância (ANOVA) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para resistividade elétrica aos 7 dias.

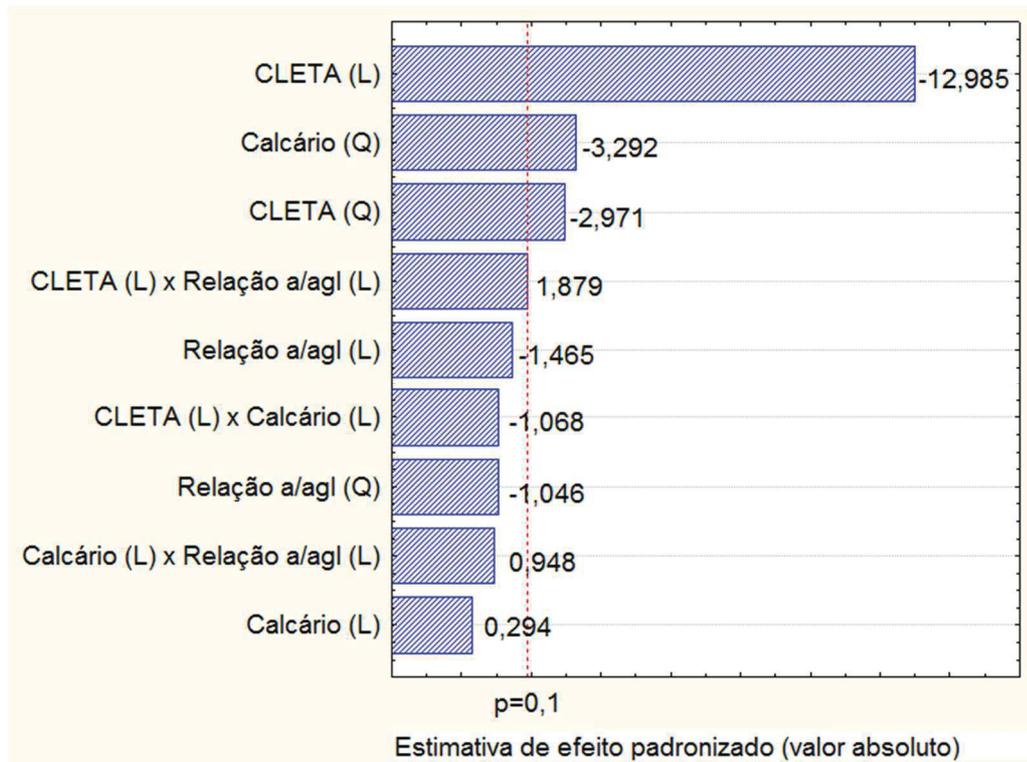
Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	$F_{\text{calculado}}$	Significância "pvalor"
Regressão	2423,37	9	269,26	21,31	0,0003 <sup>a</sup>
Erro	88,44	7	12,63		
Total	2511,81	16			
$R^2 = 0,9648$					

<sup>a</sup> Nível de confiança: 99,97%.

De acordo com o diagrama de Pareto (Figura 34) os fatores com maiores efeitos estimados aos 7 dias foram CLETA (linear e quadrático) e calcário (quadrático), sendo que o fator interação CLETA (linear) x Relação a/agl (linear) aparece no limite de significância. Os contornos da superfície de resposta que representa o modelo matemático da resistividade elétrica aos 7 dias foram gerados para as 5 relações a/agl utilizadas nesta pesquisa e são ilustrados na Figura 35.

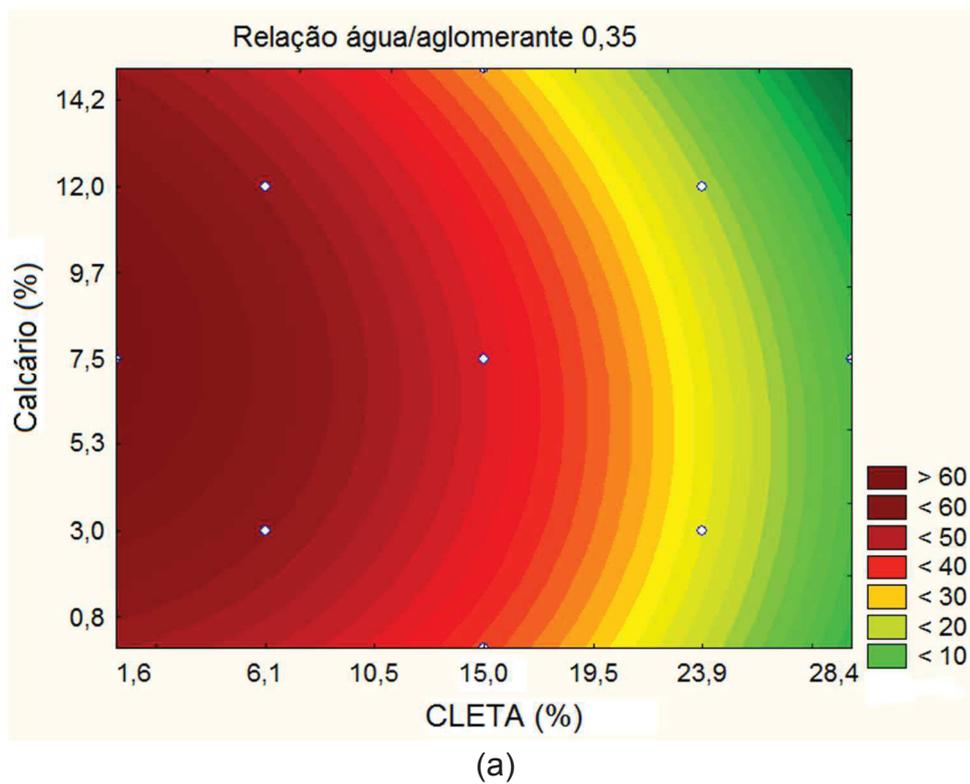
<sup>12</sup> O fator foi considerado significativo no diagrama de Pareto quando ultrapassou a linha limite de  $p=0,1$ , correspondente ao nível de significância  $\alpha$  fixado de 10% ( $\alpha = 0,1$ ). O sinal do fator linear (L) indica se a variável foi benéfica (sinal positivo) ou prejudicial (sinal negativo) à propriedade analisada. Já o sinal do fator quadrático (Q) indica que a variável apresentou um ponto de mínimo (sinal positivo) ou de máximo (sinal negativo).

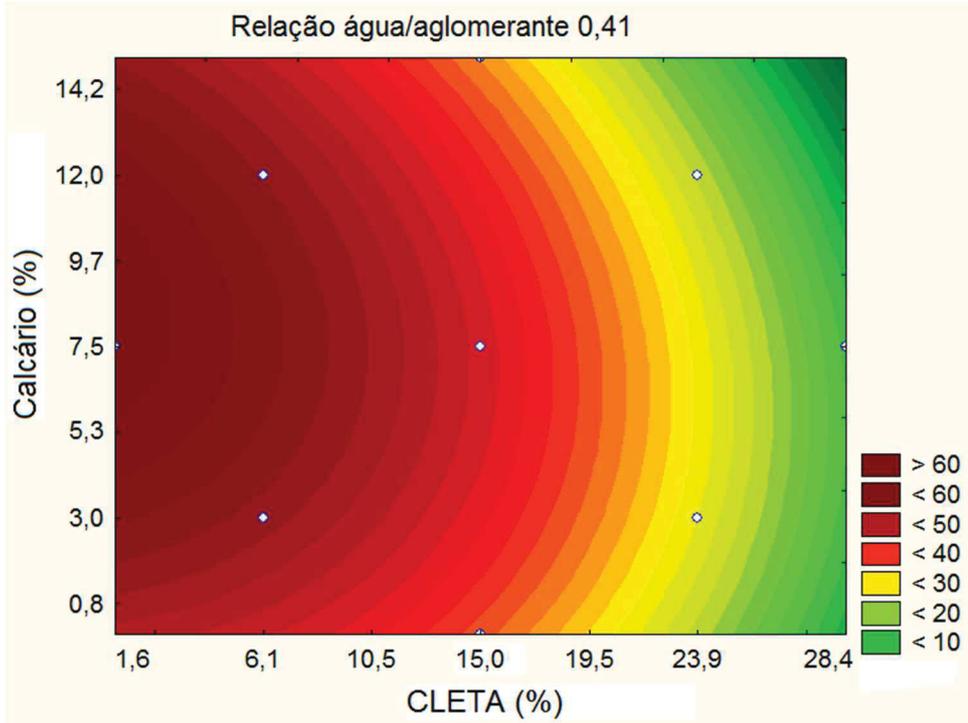
Figura 34 - Diagrama de Pareto para a resistividade elétrica aos 7 dias.



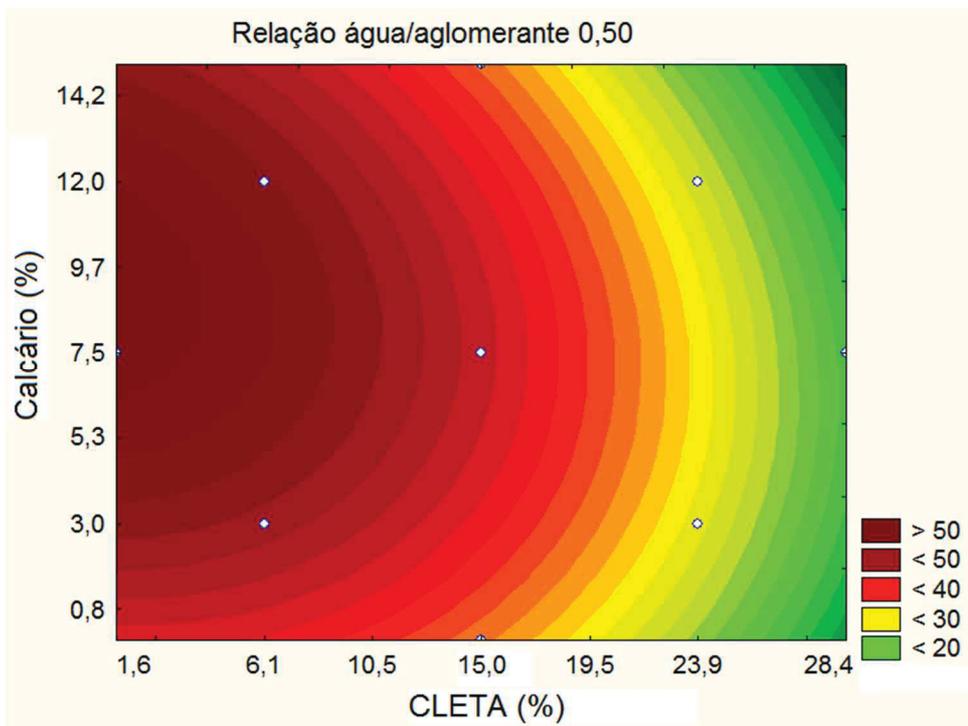
Fonte: Software Statistica.

Figura 35 - Contornos da superfície de resposta da resistividade elétrica aos 7 dias para as relações água/aglomerante 0,35 (a); 0,41 (b); 0,50 (c); 0,59 (d) e 0,65 (e).

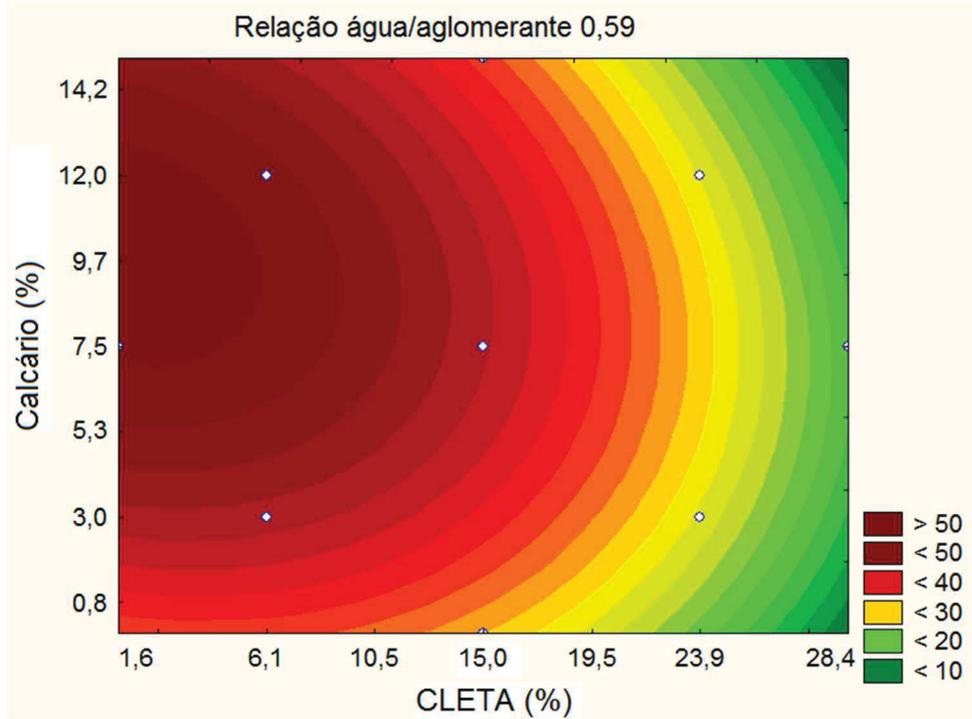




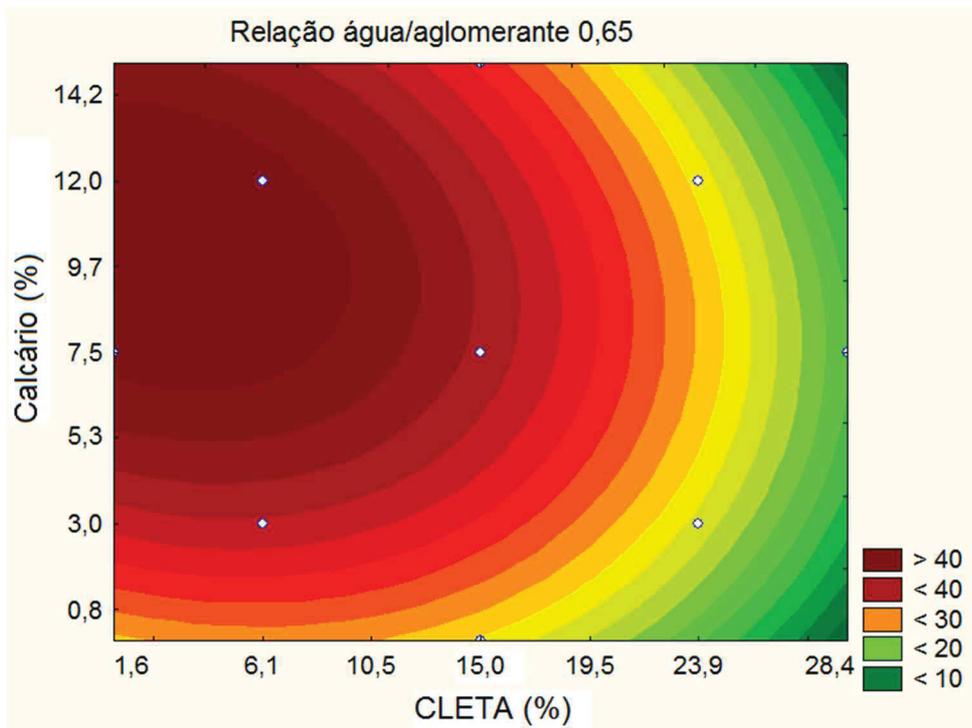
(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Software Statistica.

O efeito negativo do fator CLETA (linear), indicado pelo diagrama de Pareto (Figura 34), pode ser verificado na Figura 35 em todas as relações a/agl, com a região

de máxima resistividade elétrica tendendo aos teores mínimos de CLETA. Nos dados experimentais este efeito pode ser observado por meio dos índices de resistividade elétrica ( $I_p$ ), apresentados na Tabela 12. De maneira geral, os maiores  $I_p$ 's foram observados nos traços com baixos teores de CLETA (Traços 1, 4, 5, 8 e 9) e os menores, nos traços com altos teores desta adição mineral (Traços 2, 3, 6, 7 e 10).

Tabela 12 - Valores médios corrigidos de resistividade elétrica aparente ( $\rho_{\text{corrigidos}}$ ) e índices de resistividade elétrica ( $I_p$ ) aos 7 dias.

Traço	Variáveis			Resistividade elétrica aparente corrigida $\rho_{\text{corrigida}} (\Omega.m)$	$I_p$
	CLETA (%)	Calcário (%)	Relação a/agl		
REF 0,35	0,0	0,0	0,35	64,63	1,00
REF 0,41	0,0	0,0	0,41	64,37	1,00
REF 0,50	0,0	0,0	0,50	62,35	1,00
REF 0,59	0,0	0,0	0,59	58,38	1,00
REF 0,65	0,0	0,0	0,65	54,56	1,00
1	6,1	3,0	0,41	53,61	0,83
2	23,9	3,0	0,41	23,55	0,37
3	23,9	12,0	0,41	18,20	0,28
4	6,1	12,0	0,41	52,22	0,81
5	6,1	3,0	0,59	43,29	0,74
6	23,9	3,0	0,59	24,10	0,41
7	23,9	12,0	0,59	22,10	0,38
8	6,1	12,0	0,59	48,08	0,82
9	0,0	7,5	0,50	56,41	0,90
10	30,0	7,5	0,50	19,95	0,32
11	15,0	0,0	0,50	34,90	0,56
12	15,0	15,0	0,50	39,54	0,63
13	15,0	7,5	0,35	46,69	0,72
14	15,0	7,5	0,65	41,19	0,75
15	15,0	7,5	0,50	43,68	0,70
16	15,0	7,5	0,50	45,83	0,74
17	15,0	7,5	0,50	44,47	0,71

O fator CLETA (quadrático) negativo indica a existência de um ponto de máximo de substituição. Conforme a Figura 35, este ponto de máximo também tende a ocorrer no teor mínimo de CLETA (0%), sendo que os picos de resistividade elétrica

foram maiores para este teor nas relações  $a/agl$  0,35 e 0,41. A partir da relação  $a/agl$  0,50 houve um deslocamento da região de máxima resistividade, indo em direção a maiores teores de substituição, embora ainda muito baixos (entre 1% e 2%). Isso pode ter ocorrido devido ao fator interação CLETA (linear) x Relação  $a/agl$  (linear) estar no limiar de significância e ter sinal positivo no diagrama de Pareto (Figura 34), indicando que ambos os fatores se relacionam positivamente na mistura.

Assim como o fator CLETA (quadrático), o fator calcário (quadrático) também possui sinal negativo, o que indica a existência de um ponto de máximo. Por meio da Figura 35 pode-se dizer que ocorreu em torno do teor médio de calcário (7,5%), nas menores relações  $a/agl$ .

Embora o fator relação  $a/agl$  (linear) não tenha sido considerado significativo para esta idade pelo diagrama de Pareto, observou-se pequena redução dos picos de máxima resistividade elétrica com o aumento da relação  $a/agl$  nos contornos da superfície de resposta. Uma tendência pode ser observada, no entanto, a partir dos valores de resistividade elétrica corrigidos (Tabela 16). De maneira geral, nos traços com mesmo teor de substituição houve pequena redução dos valores de resistividade elétrica quando a relação  $a/agl$  aumentou. A  $\rho_{corrigida}$  do ponto central (média dos resultados dos Traços 15, 16 e 17) sofreu redução de 4,3% em relação à do Traço 13, e a do Traço 14 de 7,8% em relação ao valor médio do ponto central, por exemplo.

#### 5.1.1.2 14 dias

A partir dos dados experimentais de resistividade elétrica aos 14 dias apresentados na Tabela 10 também buscou-se ajustar um modelo matemático. O nível de significância de 0,0022 observado na Tabela 13 sugere que as variáveis representadas no modelo relacionam-se com nível de confiança de 99,78% e o valor do  $R^2$  indicou que o modelo conseguiu explicar os valores observados em 93,48% dos casos aos 14 dias.

De acordo com o diagrama de Pareto (Figura 36), os fatores significativos aos 14 dias foram CLETA (linear e quadrático), calcário (quadrático), relação  $a/agl$  (linear) e interação CLETA (linear) x Relação  $a/agl$  (linear). Os contornos da superfície de resposta que representa o modelo matemático foram gerados também aos 14 dias e são apresentados na Figura 37.

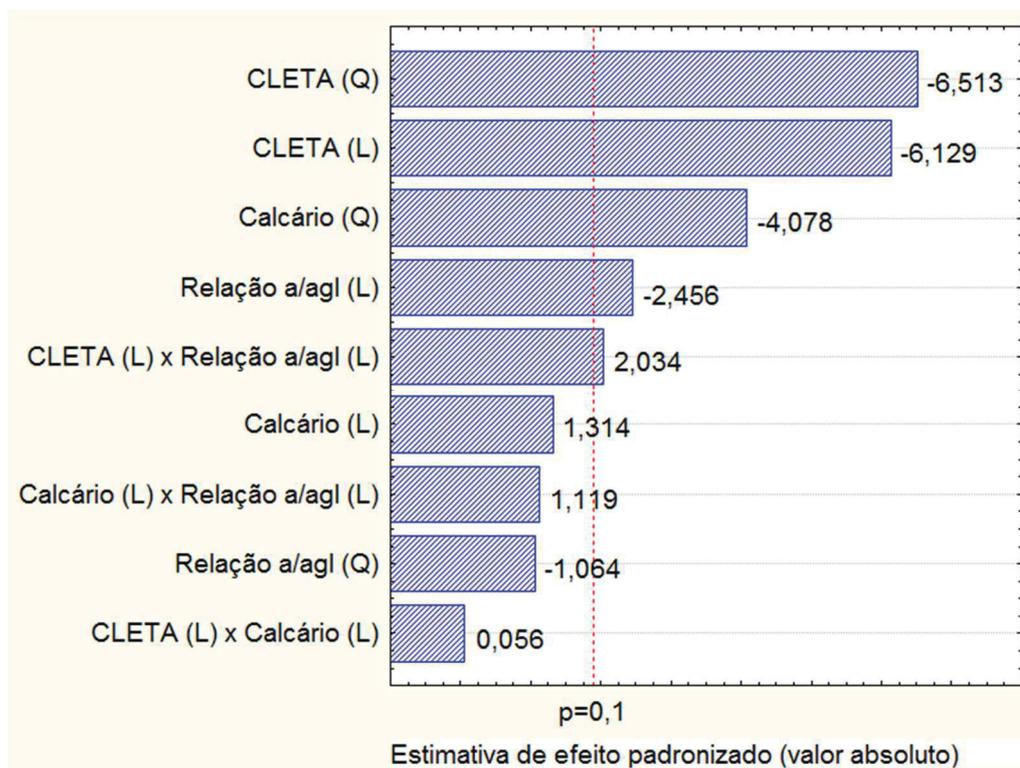
Tabela 13 - Análise de variância (ANOVA) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para resistividade elétrica aos 14 dias.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	$F_{\text{calculado}}$	Significância "pvalor"
Regressão	3385,06	9	376,12	11,15	0,0022 <sup>a</sup>
Erro	236,19	7	33,74		
Total	3621,25	16			

$R^2 = 0,9348$

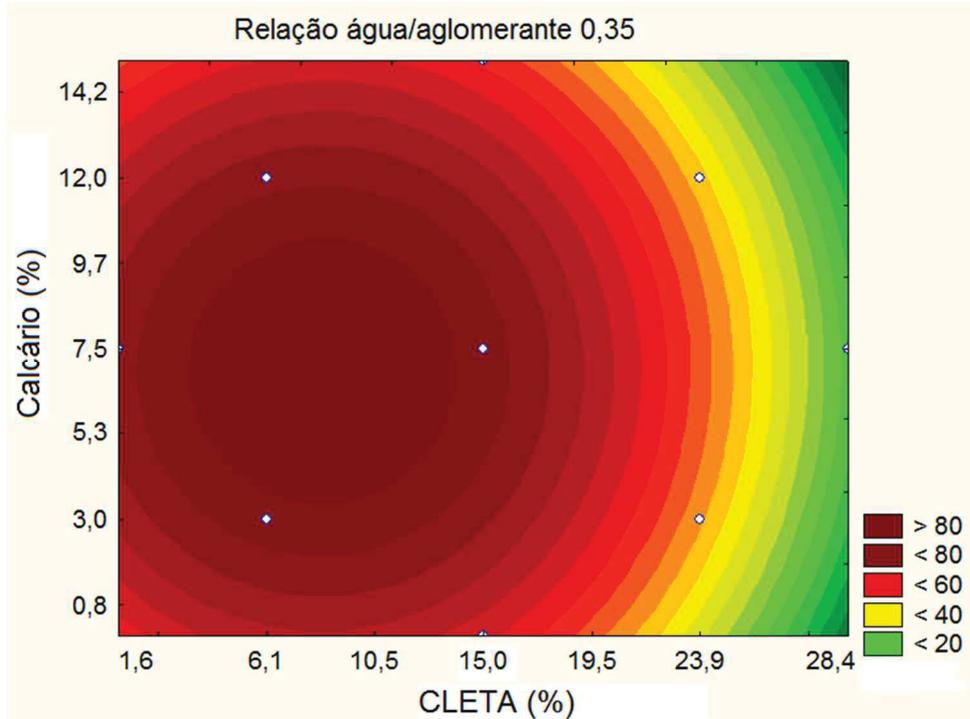
<sup>a</sup> Nível de confiança: 99,78%.

Figura 36 - Diagrama de Pareto para a resistividade elétrica aos 14 dias.

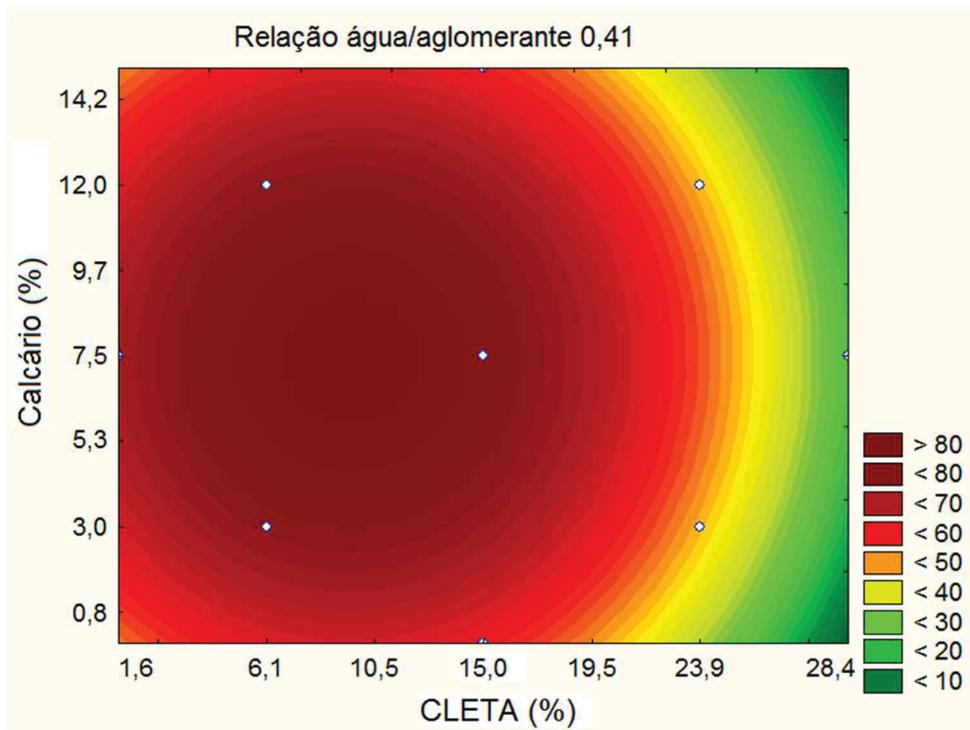


Fonte: Software Statistica.

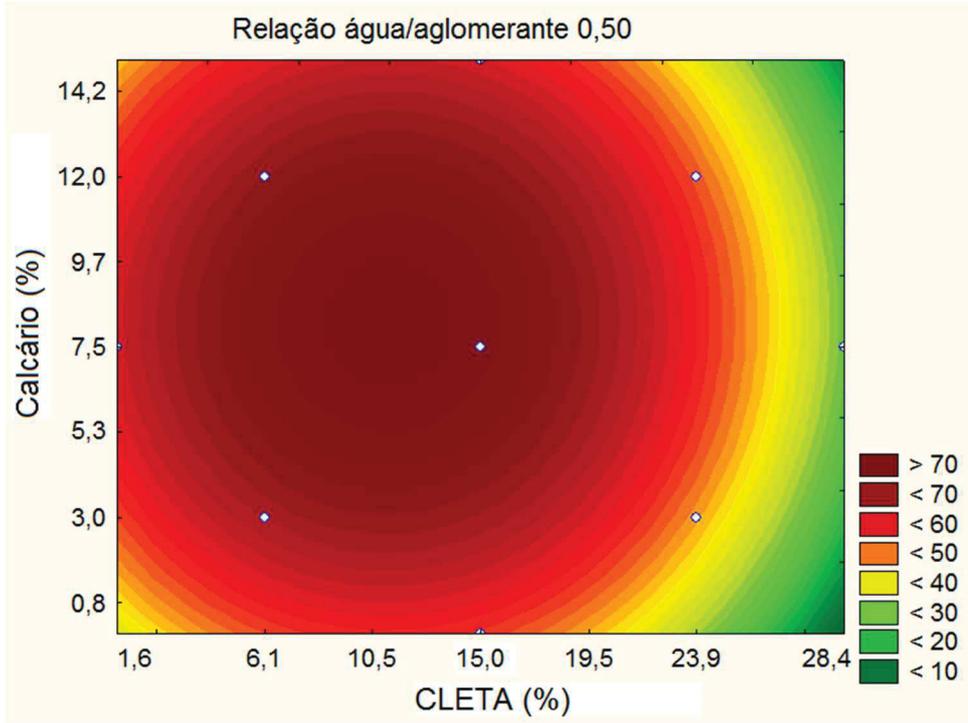
Figura 37 - Contornos da superfície de resposta da resistividade elétrica aos 14 dias para as relações água/aglomerante 0,35 (a); 0,41 (b); 0,50 (c); 0,59 (d) e 0,65 (e).



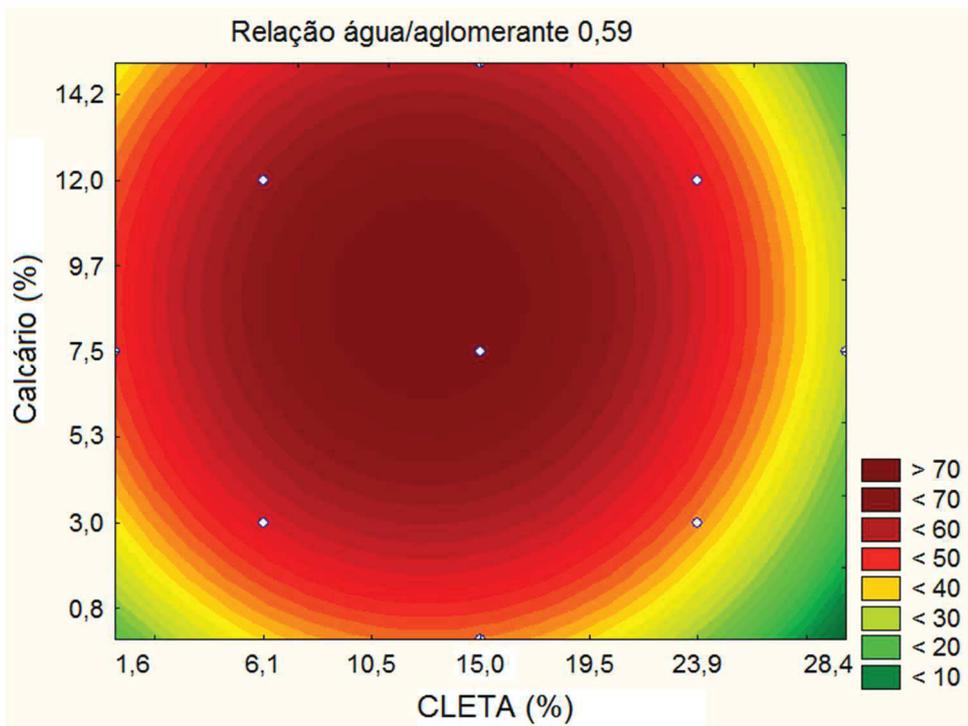
(a)



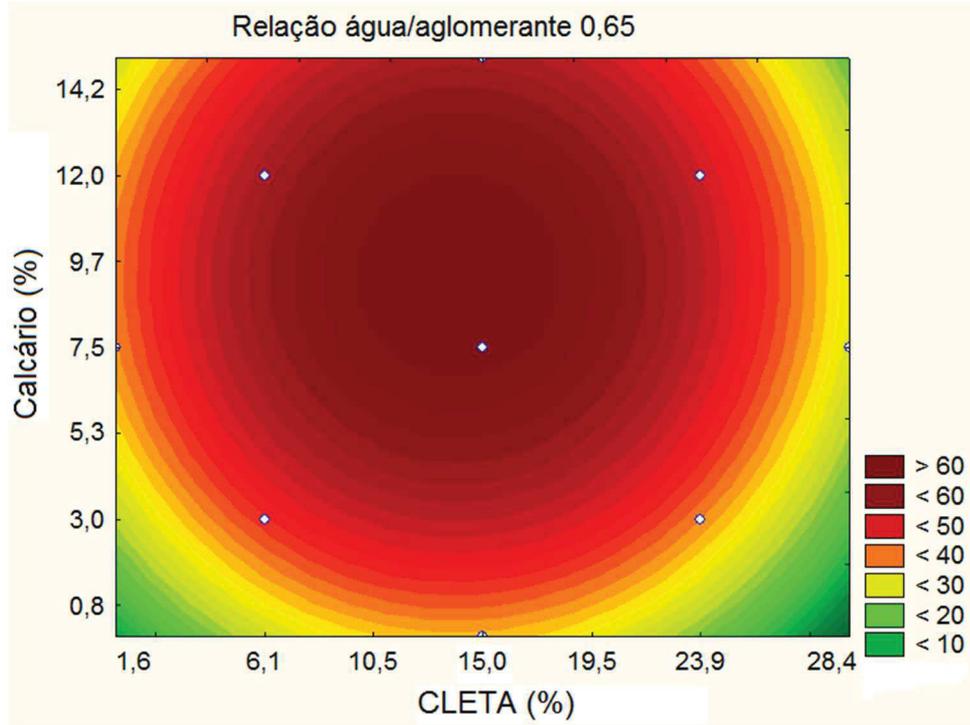
(b)



(c)



(d)



Fonte: Software Statistica.

De acordo com o diagrama de Pareto (Figura 36), o fator interação CLETA (linear) x Relação a/agl (linear) foi considerado significativo aos 14 dias, com efeito positivo. Isso foi observado a partir do deslocamento da região de máxima resistividade nos contornos da superfície de resposta, conforme a relação a/agl aumentou, de teores em torno de 9% de CLETA na relação a/agl 0,35 para teores próximos ao ponto médio (15%) na relação a/agl 0,65. O ponto de máximo do fator CLETA (quadrático) parece situar-se entre 9% e 10% de CLETA nas relações a/agl 0,35 e 0,41, onde percebem-se os maiores picos de resistividade elétrica.

Parece haver, no entanto, redução dos valores de resistividade elétrica com o aumento tanto do teor de substituição de CLETA quanto da relação a/agl, apontada pelos efeitos negativos para ambos os fatores individuais (lineares) observados no diagrama de Pareto.

Por meio dos índices de resistividade elétrica ( $I_p$ ) obtidos a partir dos dados experimentais (Tabela 14), nota-se que os traços com baixos teores de CLETA ainda possuem elevado  $I_p$  (Traços 1, 4, 5, 8 e 9), mas com baixa elevação em relação ao observado aos 7 dias. Os maiores aumentos dos  $I_p$ 's ocorreram para os traços que continham baixo  $I_p$  aos 7 dias (Traços 2, 3, 6 e 7, com exceção do Traço 10). Este

comportamento é mostrado no diagrama de Pareto por meio do menor efeito estimado negativo do fator CLETA (linear) aos 14 dias em relação aquele observado aos 7 dias, indicando que maiores teores de CLETA podem ser benéficos para a resistividade elétrica.

Tabela 14 - Valores médios corrigidos de resistividade elétrica aparente ( $\rho_{\text{corrigidos}}$ ) e índices de resistividade elétrica ( $I_{\rho}$ ) aos 14 dias.

Traço	Variáveis			Resistividade elétrica aparente corrigida $\rho_{\text{corrigida}} (\Omega.m)$	$I_{\rho}$
	CLETA (%)	Calcário (%)	Relação a/agl		
REF 0,35	0,0	0,0	0,35	73,88	1,00
REF 0,41	0,0	0,0	0,41	73,50	1,00
REF 0,50	0,0	0,0	0,50	71,10	1,00
REF 0,59	0,0	0,0	0,59	66,51	1,00
REF 0,65	0,0	0,0	0,65	62,15	1,00
1	6,1	3,0	0,41	70,60	0,96
2	23,9	3,0	0,41	47,99	0,65
3	23,9	12,0	0,41	43,09	0,59
4	6,1	12,0	0,41	69,18	0,94
5	6,1	3,0	0,59	52,38	0,79
6	23,9	3,0	0,59	42,54	0,64
7	23,9	12,0	0,59	50,77	0,76
8	6,1	12,0	0,59	56,21	0,85
9	0,0	7,5	0,50	68,71	0,97
10	30,0	7,5	0,50	28,52	0,40
11	15,0	0,0	0,50	53,84	0,76
12	15,0	15,0	0,50	67,20	0,95
13	15,0	7,5	0,35	82,33	1,11
14	15,0	7,5	0,65	68,20	1,10
15	15,0	7,5	0,50	78,20	1,10
16	15,0	7,5	0,50	74,29	1,04
17	15,0	7,5	0,50	76,74	1,08

A redução dos picos de máxima resistividade elétrica observada nos contornos de superfície de resposta conforme a relação a/agl aumentou condiz com o fator relação a/agl (linear) negativo mostrado no diagrama de Pareto (Figura 36). Por meio dos dados experimentais (Tabela 14), observou-se novamente uma tendência à

redução da resistividade elétrica quando a relação a/agl aumentou, sendo esta redução maior que aquela observada aos 7 dias. Tomando como referência novamente os Traços 13, 14 e ponto central (média dos resultados dos Traços 15, 16 e 17), a  $\rho_{\text{corrigida}}$  do ponto central sofreu redução de 7,2% em relação à do Traço 13 e a do Traço 14, de 10,7% em relação ao valor médio do ponto central. Além disso, estes mesmos traços (com teores de substituição de 15% de CLETA e 7,50% de calcário) já apresentaram resistividade elétrica superiores às daquelas dos traços de referência de mesma relação a/agl aos 14 dias.

Por fim, assim como aos 7 dias o fator calcário (quadrático) também possui sinal negativo no diagrama de Pareto, o que indica a existência de um ponto de máximo. Levando em consideração a região de máxima resistividade observada na Figura 37, este ponto ainda situa-se próximo ao teor médio de calcário (7,5%).

#### 5.1.1.3 28 dias

Assim como para as demais idades, houve a tentativa de ajuste de um modelo matemático a partir dos dados experimentais de resistividade elétrica apresentados na Tabela 10 também aos 28 dias. O nível de significância de 0,0093 observado na Tabela 15 sugere que as variáveis representadas no modelo relacionam-se com nível de confiança de 99,07% e o valor do  $R^2$  indicou que o modelo conseguiu explicar os valores observados em 89,88% dos casos aos 28 dias.

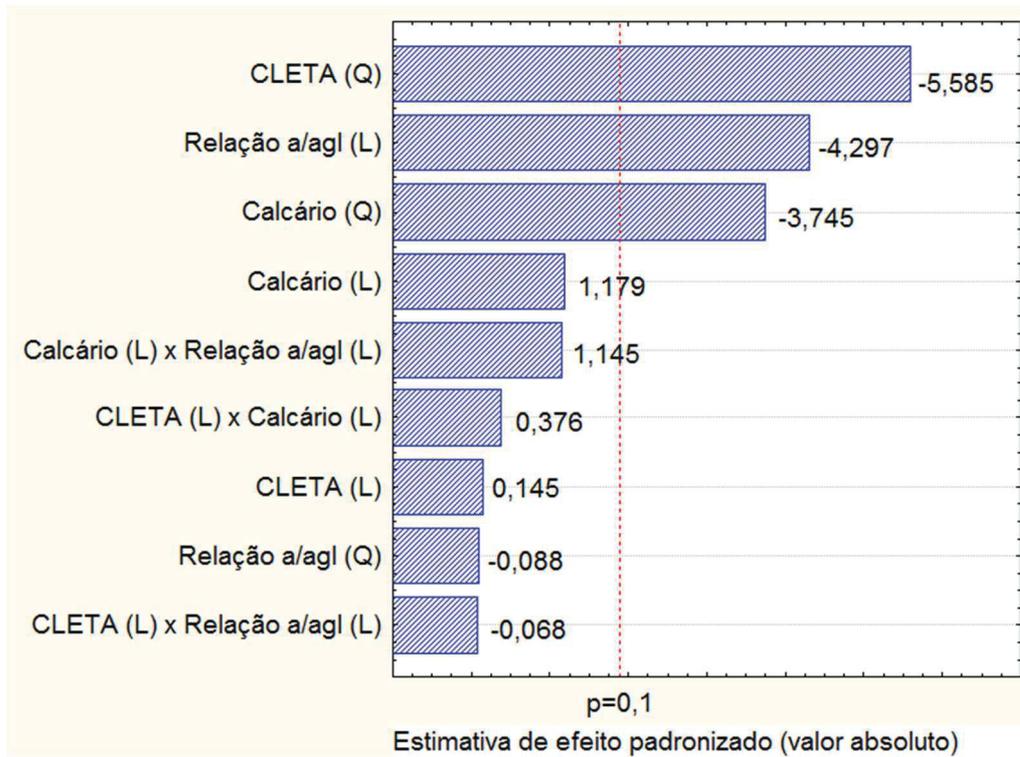
De acordo com o diagrama de Pareto (Figura 38), as variáveis significativas para esta idade são CLETA (quadrático), relação a/agl (linear) e calcário (quadrático). Os contornos da superfície de resposta que representa o modelo matemático aos 28 dias são apresentados na Figura 39.

Tabela 15 - Análise de variância (ANOVA) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para resistividade elétrica aos 28 dias.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	$F_{\text{calculado}}$	Significância "pvalor"
Regressão	5119,53	9	568,84	6,90	0,0093 <sup>a</sup>
Erro	576,70	7	82,39		
Total	5696,23	16			
$R^2 = 0,8988$					

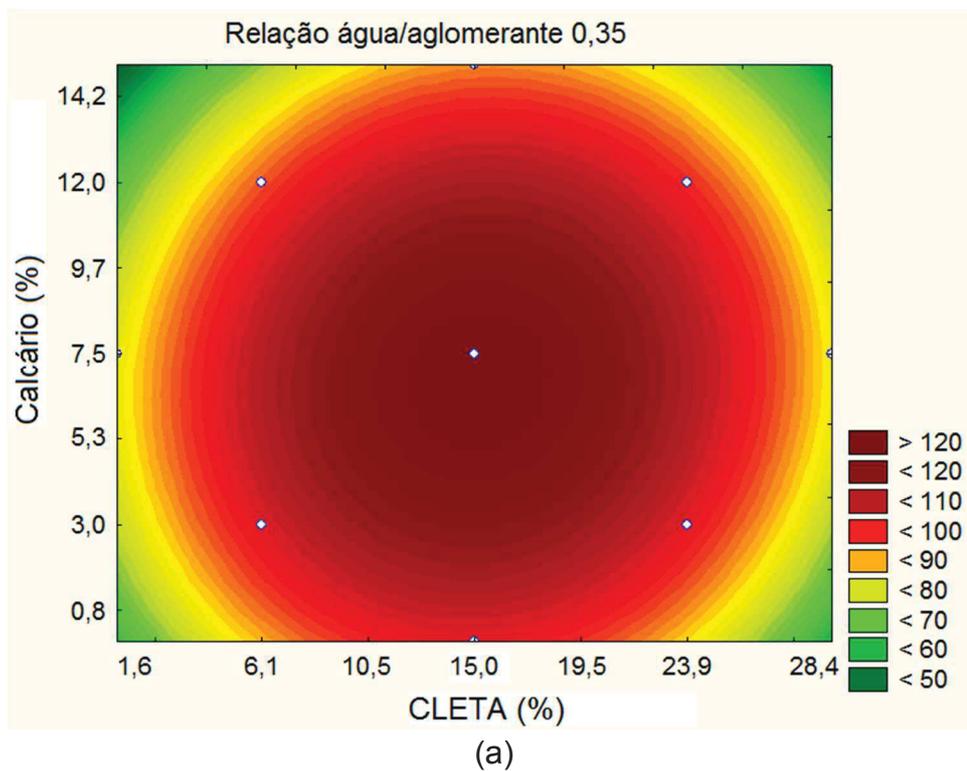
<sup>a</sup> Nível de confiança: 99,07%.

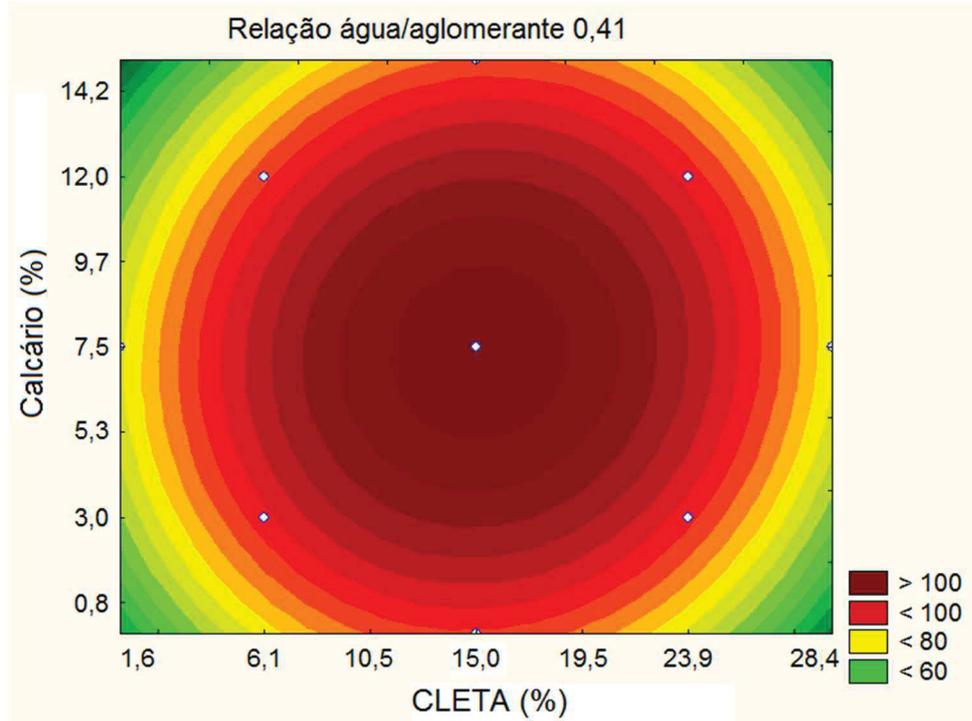
Figura 38 – Diagrama de Pareto para a resistividade elétrica aos 28 dias.



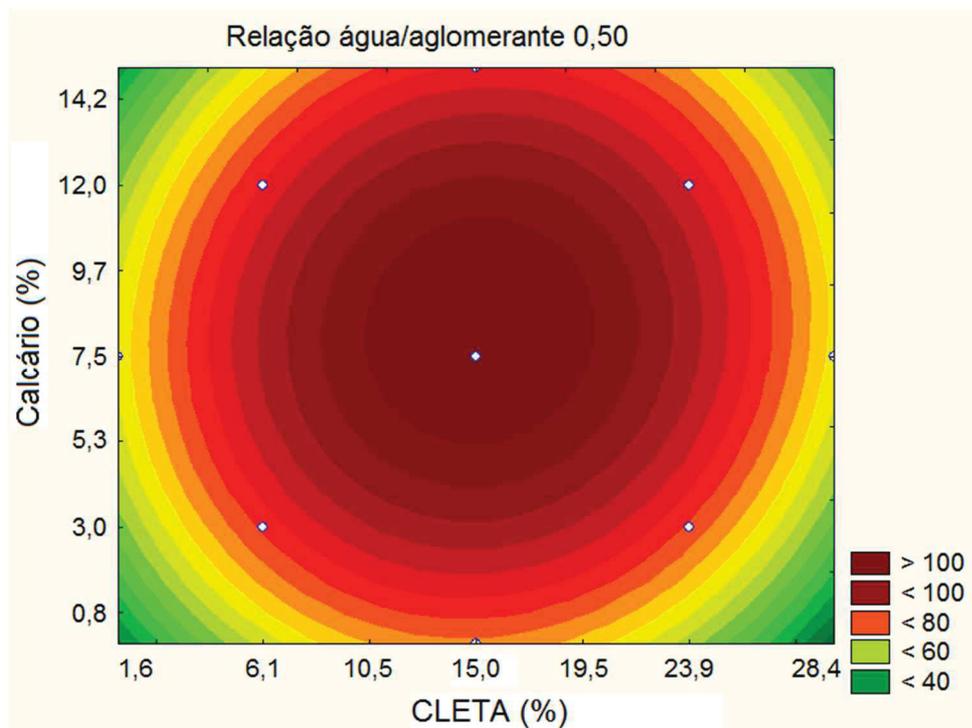
Fonte: Software Statistica.

Figura 39 - Contornos da superfície de resposta da resistividade elétrica aos 28 dias para as relações água/aglomerante 0,35 (a); 0,41 (b); 0,50 (c); 0,59 (d) e 0,65 (e).

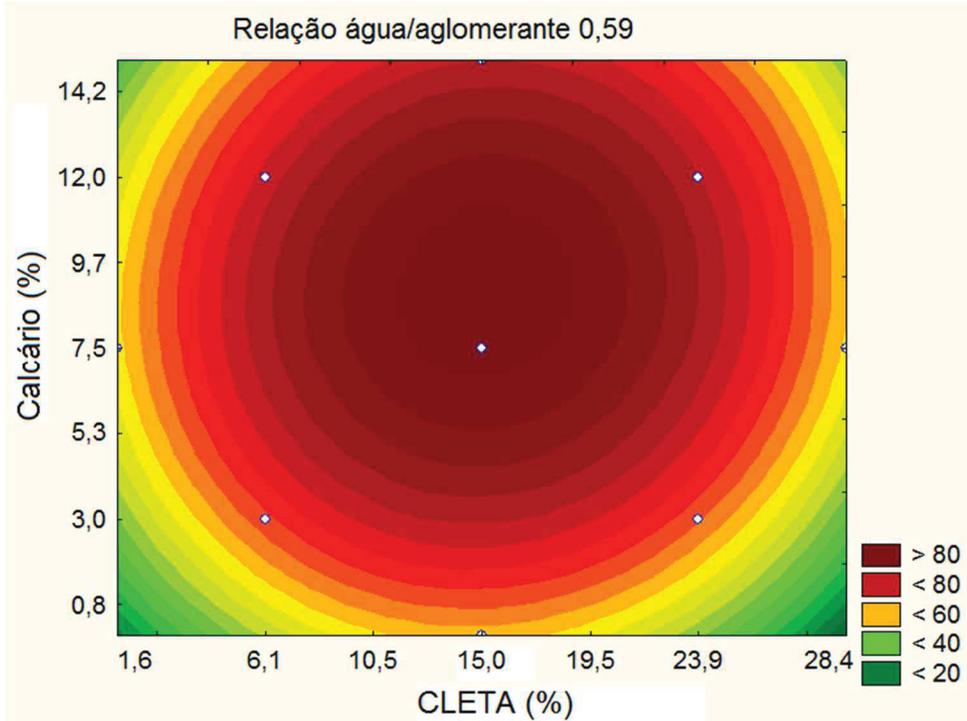




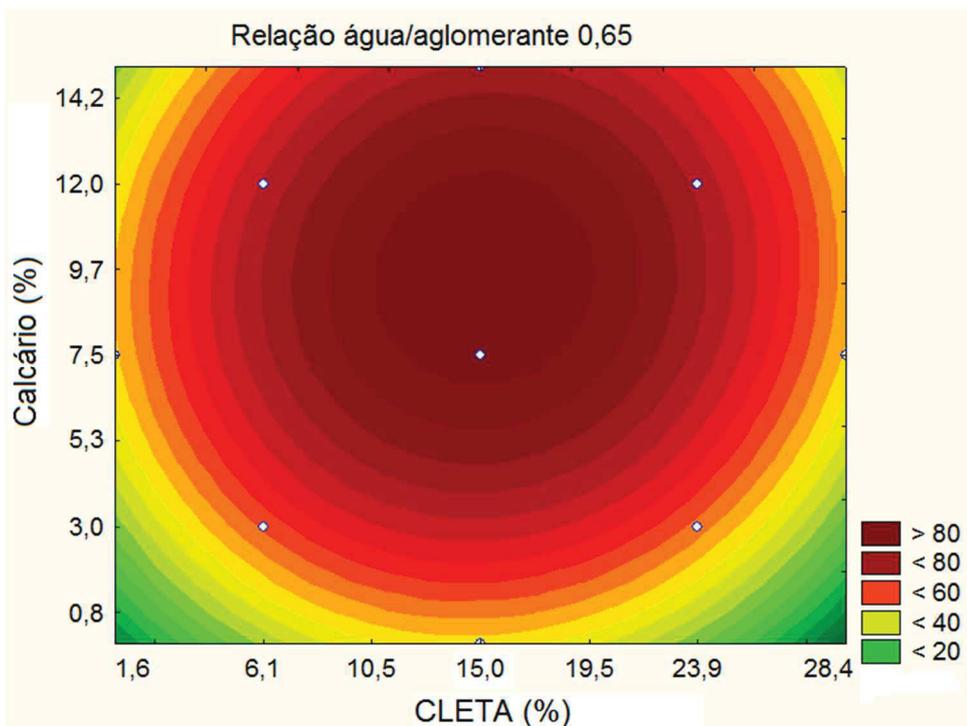
(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Software Statistica.

Para esta idade, tanto o fator CLETA (quadrático) quanto o fator calcário (quadrático) continuam apresentando sinal negativo no diagrama de Pareto (Figura

38), o que indica a existência de um ponto de máximo para ambas as variáveis. Por meio da posição da região de máxima resistividade mostrada nos contornos de superfície de resposta, estes pontos parecem situar-se em torno do teor médio de substituição tanto da CLETA (15%) quanto do calcário (7,5%), especialmente nas menores relações a/agl. Os índices de resistividade elétrica ( $I_p$ ) (Tabela 16) dos traços com estes teores de substituição também são os maiores aos 28 dias.

Tabela 16 - Valores médios corrigidos de resistividade elétrica aparente ( $\rho_{\text{corrigidos}}$ ) e índices de resistividade elétrica ( $I_p$ ) aos 28 dias.

Traço	Variáveis			Resistividade elétrica aparente corrigida $\rho_{\text{corrigida}}$ ( $\Omega.m$ )	$I_p$
	CLETA (%)	Calcário (%)	Relação a/agl		
REF 0,35	0,0	0,0	0,35	93,06	1,00
REF 0,41	0,0	0,0	0,41	88,28	1,00
REF 0,50	0,0	0,0	0,50	81,06	1,00
REF 0,59	0,0	0,0	0,59	74,00	1,00
REF 0,65	0,0	0,0	0,65	69,00	1,00
1	6,1	3,0	0,41	87,47	0,99
2	23,9	3,0	0,41	96,72	1,10
3	23,9	12,0	0,41	91,61	1,04
4	6,1	12,0	0,41	83,22	0,94
5	6,1	3,0	0,59	64,30	0,87
6	23,9	3,0	0,59	66,99	0,91
7	23,9	12,0	0,59	82,27	1,11
8	6,1	12,0	0,59	69,06	0,93
9	0,0	7,5	0,50	78,04	0,96
10	30,0	7,5	0,50	60,99	0,75
11	15,0	0,0	0,50	75,00	0,93
12	15,0	15,0	0,50	92,17	1,14
13	15,0	7,5	0,35	131,68	1,42
14	15,0	7,5	0,65	91,40	1,32
15	15,0	7,5	0,50	114,39	1,41
16	15,0	7,5	0,50	104,40	1,29
17	15,0	7,5	0,50	105,02	1,30

De acordo com o diagrama de Pareto, o fator relação a/agl (linear) é significativo com fator estimado negativo. O valor deste efeito é maior que aqueles observados

nas idades anteriores, indicando que a redução da resistividade elétrica foi maior que a observada aos 14 ou aos 7 dias quando a relação  $a/agl$  aumentou. Este efeito pode ser verificado novamente para os traços com teores de substituição de 15% CLETA e 7,5% de calcário com redução de 18% quando a relação  $a/agl$  passou de 0,35 para 0,50 (Traço 13 e ponto central) e de 15,3% quando a relação  $a/agl$  passou de 0,50 para 0,65 (ponto central e Traço 14).

Nos traços com baixo teor de CLETA (Traços 1, 4, 5, 8 e 9) não observou-se variação significativa dos  $I_p$ 's nesta idade em relação aqueles observados aos 14 dias. Os traços com elevado teor CLETA (Traços 2, 3, 6, 7 e 10), no entanto, foram os que apresentaram maior aumento no  $I_p$  dos 14 para os 28 dias, sendo o maior aumento o do Traço 10, seguido pelo Traço 3. Este comportamento parece contraditório, tendo em vista que o fator CLETA (linear) não foi considerado significativo pelo diagrama de Pareto para esta idade. No entanto, o efeito benéfico da CLETA para a resistividade elétrica pode ser observado no diagrama de Pareto por meio da transição do efeito negativo deste fator nas idades iniciais para um efeito estimado positivo, próximo a zero, aos 28 dias.

#### 5.1.1.4 56 dias

Buscou-se ajustar um modelo matemático também aos 56 dias a partir dos dados experimentais de resistividade elétrica apresentados na Tabela 10. O nível de significância de 0,0013 observado na Tabela 17 sugere que as variáveis representadas no modelo relacionam-se com nível de confiança de 99,87% e o valor do  $R^2$  indicou que o modelo conseguiu explicar os valores observados em 94,48% dos casos aos 56 dias.

De acordo com o diagrama de Pareto (Figura 40), aos 56 dias o fator mais significativo passou a ser a relação  $a/agl$ , com alto efeito estimado, seguido por CLETA (linear e quadrático), calcário (linear e quadrático) e interação CLETA (linear) x Relação  $a/agl$  (linear). Os contornos da superfície de resposta que representa o modelo matemático aos 56 dias constam na Figura 41.

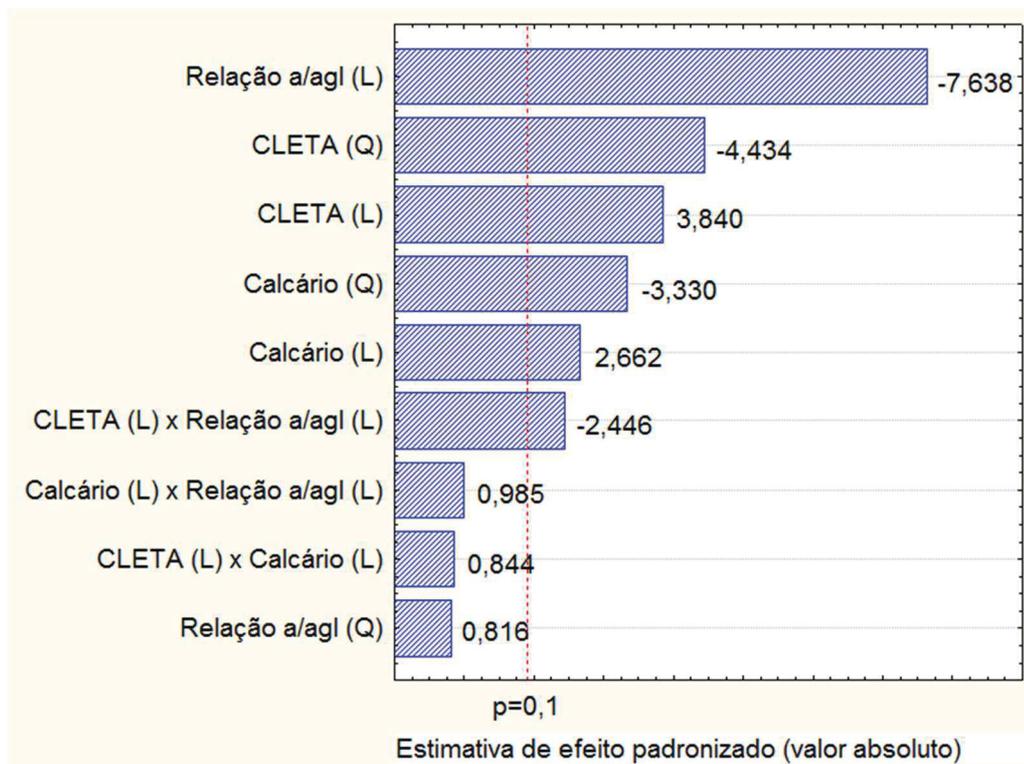
Tabela 17 - Análise de variância (ANOVA) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para resistividade elétrica aos 56 dias.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	$F_{\text{calculado}}$	Significância " $p_{\text{valor}}$ "
Regressão	12129,33	9	1347,70	13,30	0,0013 <sup>a</sup>
Erro	709,35	7	101,34		
Total	12838,68	16			

$R^2 = 0,9448$

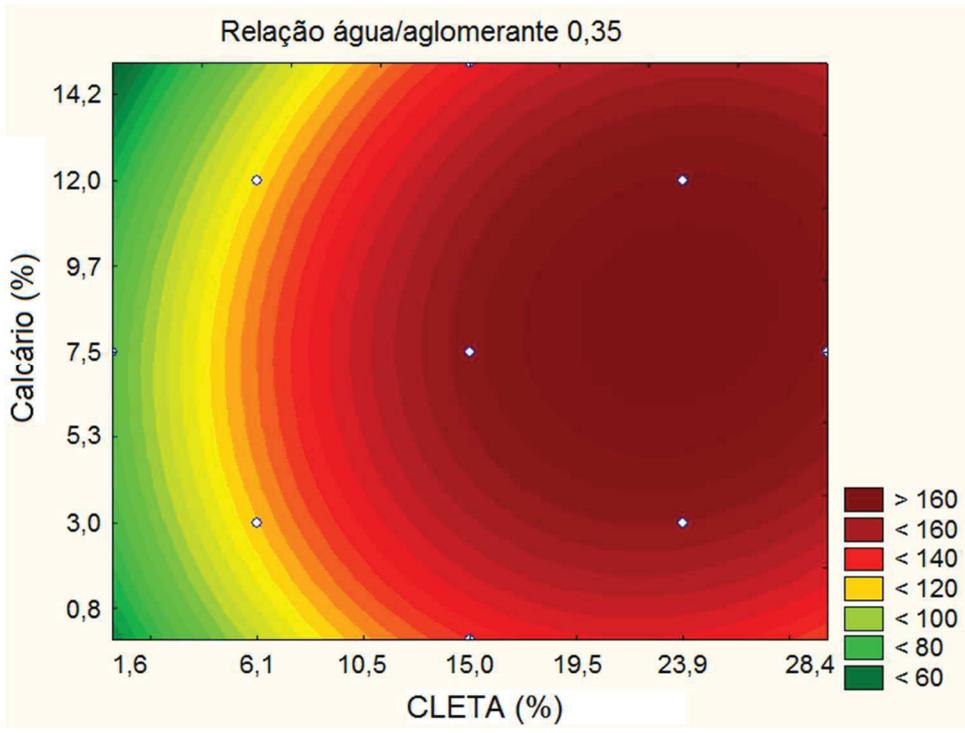
<sup>a</sup> Nível de confiança: 99,87%.

Figura 40 – Diagrama de Pareto para a resistividade elétrica aos 56 dias.

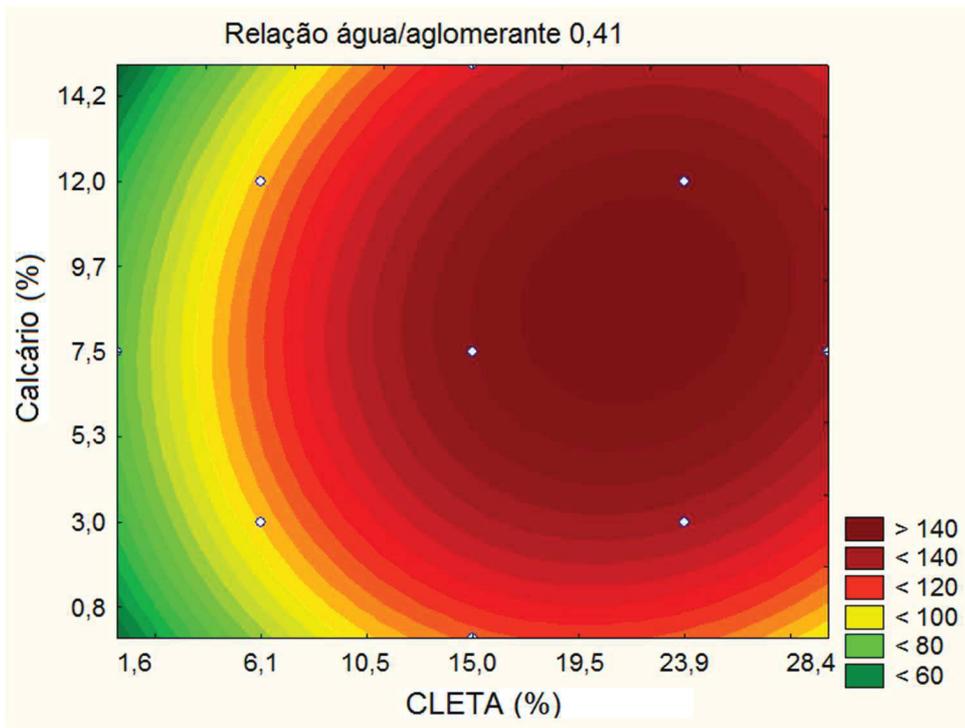


Fonte: Software Statistica.

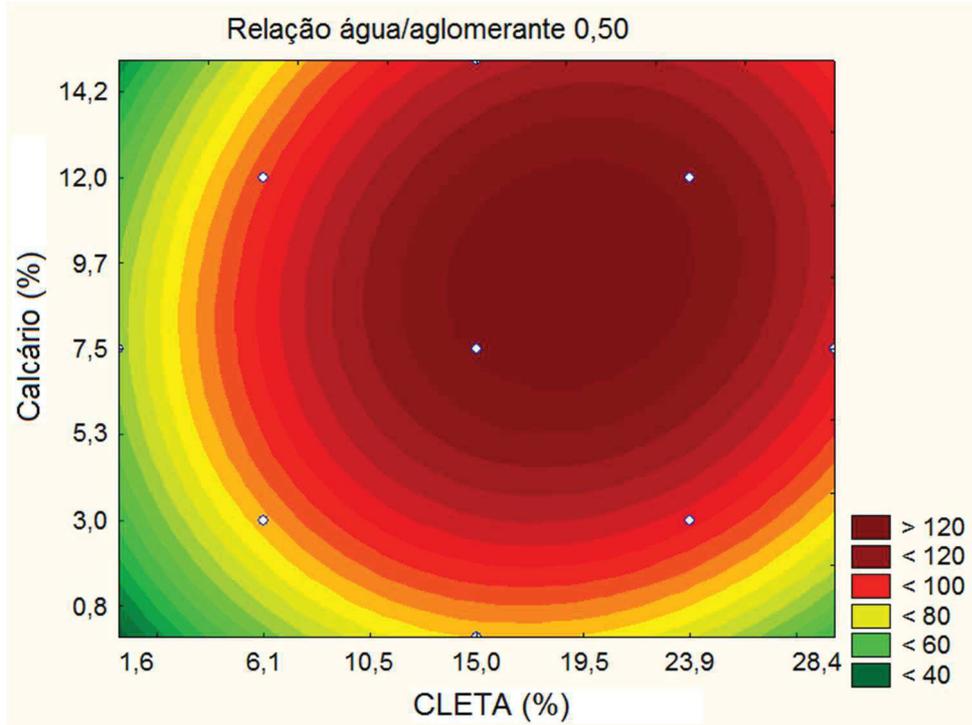
Figura 41 - Contornos da superfície de resposta da resistividade elétrica aos 56 dias para as relações água/aglomerante 0,35 (a); 0,41 (b); 0,50 (c); 0,59 (d) e 0,65 (e).



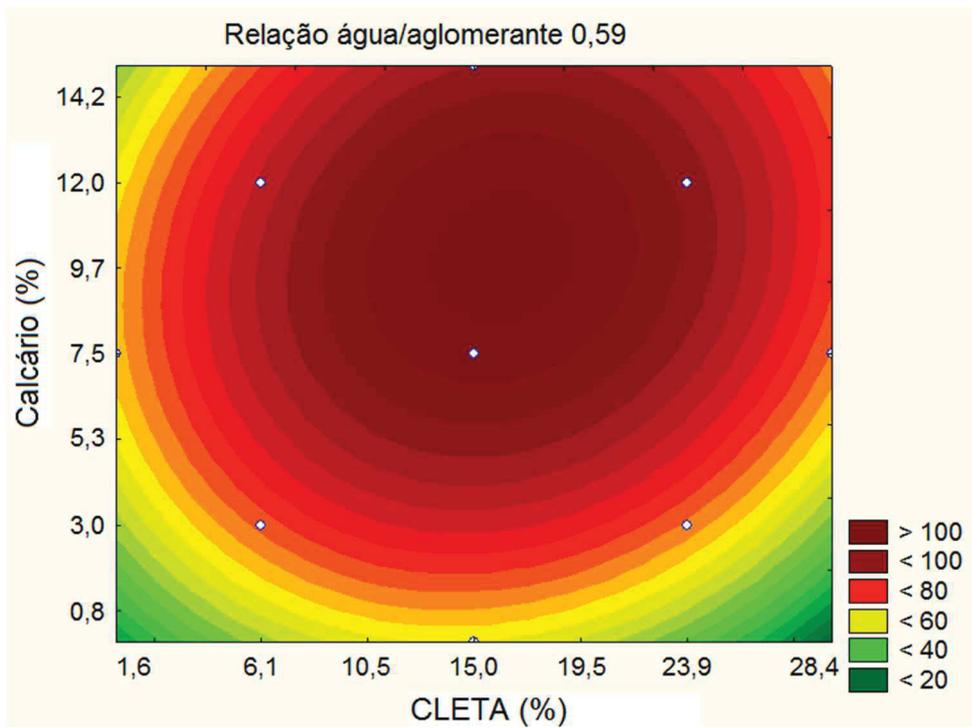
(a)



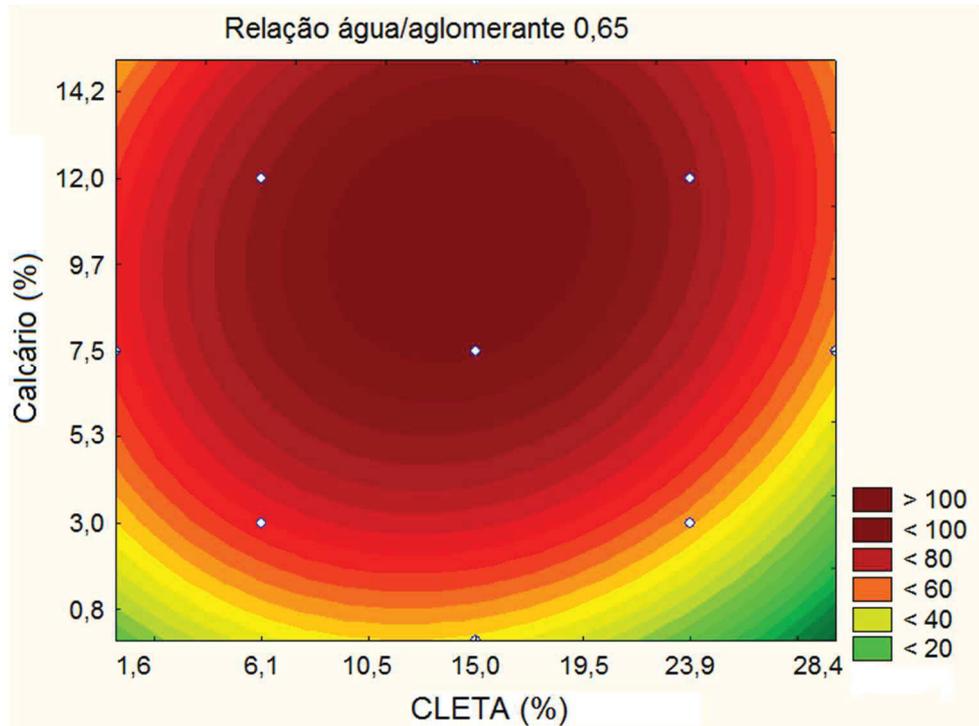
(b)



(c)



(d)



Fonte: Software Statistica.

O fator interação CLETA (linear) x Relação a/agl (linear) com efeito estimado negativo indicado pelo diagrama de Pareto (Figura 40) pode ser observado por meio dos contornos da superfície de resposta, havendo um deslocamento da região de máxima resistividade de maiores teores de substituição de CLETA (cerca de 24%) em direção ao teor médio conforme a relação a/agl aumentou. Essa redução, no entanto, deve-se ao maior efeito negativo do fator relação a/agl (linear), já que o fator CLETA (linear) positivo indica que maiores teores de substituição são benéficos para a resistividade elétrica.

O efeito positivo do fator CLETA (linear) pode ser observado por meio dos índices de resistividade elétrica ( $I_p$ ) dos Traços 2, 3 e 7, com alto teor de CLETA, que apresentaram elevados  $I_p$  nesta idade, conforme Tabela 18. O traço 10 (teor de 30% de CLETA), que apresentava um  $I_p$  de 0,32 aos 7 dias, alcançou a mesma resistividade elétrica que o traço de referência de mesma relação a/agl aos 56 dias. Esse comportamento ratifica o efeito estimado positivo do fator CLETA (linear) no diagrama de Pareto.

Tabela 18 - Valores médios corrigidos de resistividade elétrica aparente ( $\rho_{\text{corrigidos}}$ ) e índices de resistividade elétrica ( $I_p$ ) aos 56 dias.

Traço	Variáveis			Resistividade elétrica aparente corrigida $\rho_{\text{corrigida}} (\Omega.m)$	$I_p$
	CLETA (%)	Calcário (%)	Relação a/agl		
REF 0,35	0,0	0,0	0,35	109,19	1,00
REF 0,41	0,0	0,0	0,41	102,69	1,00
REF 0,50	0,0	0,0	0,50	92,26	1,00
REF 0,59	0,0	0,0	0,59	80,77	1,00
REF 0,65	0,0	0,0	0,65	72,37	1,00
1	6,1	3,0	0,41	95,89	0,93
2	23,9	3,0	0,41	146,39	1,43
3	23,9	12,0	0,41	152,04	1,48
4	6,1	12,0	0,41	103,61	1,01
5	6,1	3,0	0,59	71,10	0,88
6	23,9	3,0	0,59	72,70	0,90
7	23,9	12,0	0,59	106,44	1,32
8	6,1	12,0	0,59	78,75	0,98
9	0,0	7,5	0,50	83,54	0,91
10	30,0	7,5	0,50	92,23	1,00
11	15,0	0,0	0,50	84,07	0,91
12	15,0	15,0	0,50	110,40	1,20
13	15,0	7,5	0,35	166,64	1,53
14	15,0	7,5	0,65	98,14	1,36
15	15,0	7,5	0,50	124,35	1,35
16	15,0	7,5	0,50	125,50	1,36
17	15,0	7,5	0,50	124,08	1,34

O fator relação a/agl (linear) ainda apresenta fator estimado negativo, sendo o valor deste efeito também maior que aqueles observados nas idades anteriores. Isso indica que o aumento da relação a/agl tende a ter maior influência sobre a redução da resistividade elétrica com o aumento da idade. Por meio dos traços com teores de substituição de 15% CLETA e 7,5% de calcário este efeito é observado pela redução de 25,2% quando a relação a/agl passou de 0,35 para 0,50 (Traço 13 e ponto central) e de 21,3% quanto a relação a/agl passou de 0,50 para 0,65 (ponto central e Traço 14). Além disso, os maiores  $I_p$  foram observados para os Traços 13, 3 e 2,

respectivamente, indicando que maiores valores de resistividade elétrica em relação ao traço de referência foram observados nos traços com reduzida relação a/agl.

A existência de um ponto de máximo para as variáveis CLETA e calcário é indicada pelos efeitos estimados negativos de ambos os fatores no diagrama de Pareto. Para o calcário a região de máxima resistividade elétrica ocorreu para teores em torno de 9% para a relação a/agl 0,35, ocorrendo deslocamento para teores um pouco mais elevados conforme a relação a/agl foi aumentada. Para a CLETA, a região de máxima resistividade elétrica para a menor relação a/agl foi observada em teores em torno dos 23%, ocorrendo redução deste conforme a relação a/agl foi aumentada.

Assim como fator CLETA (linear), o fator calcário (linear) também teve efeito estimado positivo pra esta idade de acordo com o diagrama de Pareto, indicando efeito benéfico desta adição para a resistividade elétrica. No entanto, ao contrário do que aconteceu com a CLETA, o aumento da relação a/agl possibilitou aumento do teor de substituição de calcário, observado pelo deslocamento da região de máxima resistividade para teores mais altos de substituição.

#### 5.1.1.5 91 dias

Assim como feito nas demais idades, também buscou-se ajustar um modelo matemático a partir dos dados experimentais de resistividade elétrica apresentados na Tabela 10 aos 91 dias. O nível de significância de 0,0002 observado na Tabela 19 sugere que as variáveis representadas no modelo relacionam-se com nível de confiança de 99,98% e o valor do  $R^2$  indicou que o modelo conseguiu explicar os valores observados em 96,63% dos casos nesta idade.

Por meio do diagrama de Pareto para os 91 dias, apresentado na Figura 42, observou-se que o único fator que não foi considerado significativo aos 91 dias foi a interação Calcário (linear) x Relação a/agl (linear), sendo que o fator relação a/agl (linear) continua sendo o mais influente, seguido pela CLETA (linear). Os contornos da superfície de resposta que representa o modelo matemático aos 91 dias constam na Figura 43.

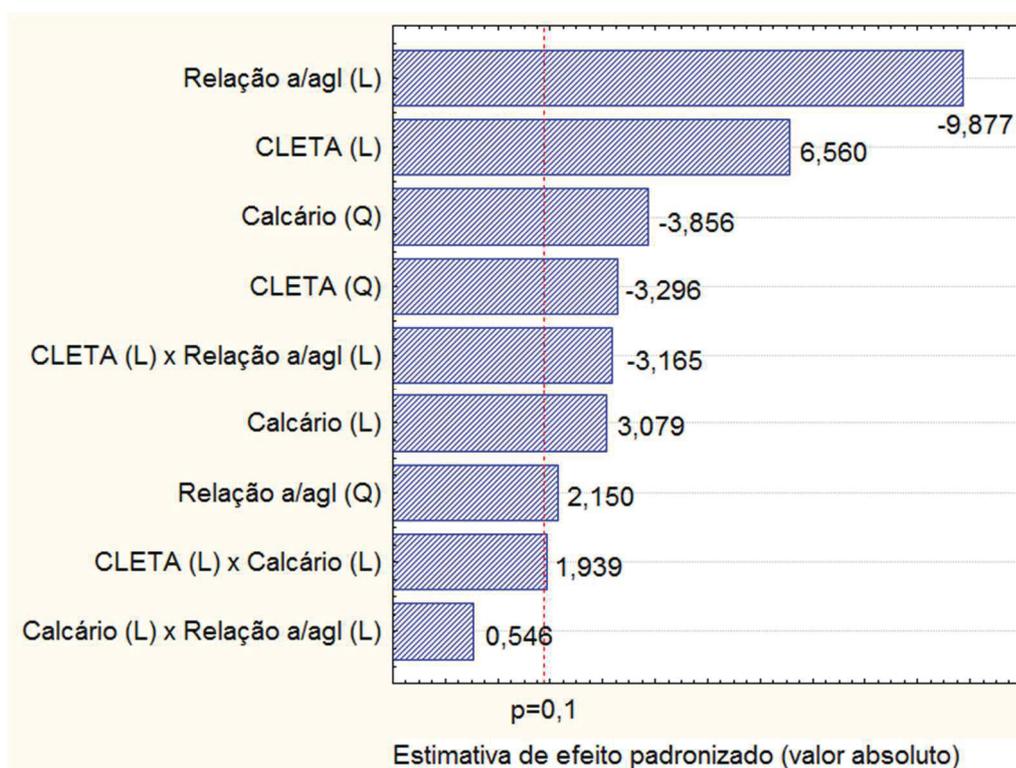
Tabela 19 - Análise de variância (ANOVA) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para resistividade elétrica aos 91 dias.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	$F_{\text{calculado}}$	Significância " $p_{\text{valor}}$ "
Regressão	26660,37	9	2962,26	22,31	0,0002 <sup>a</sup>
Erro	929,65	7	132,81		
Total	27590,02	16			

$R^2 = 0,9663$

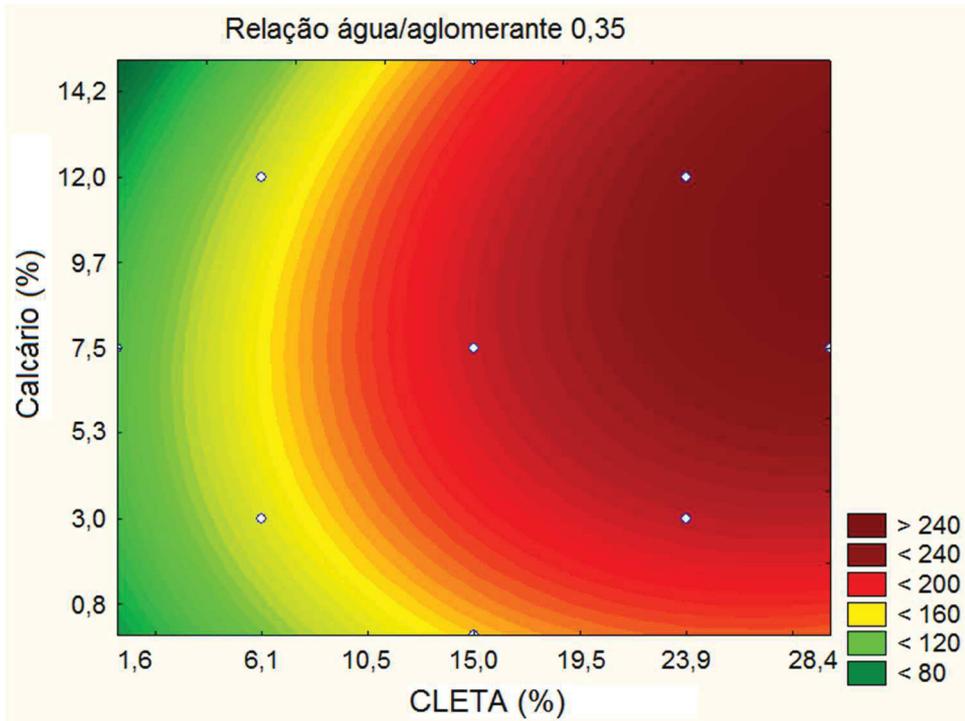
<sup>a</sup> Nível de confiança: 99,98%.

Figura 42 - Diagrama de Pareto para a resistividade elétrica aos 91 dias.

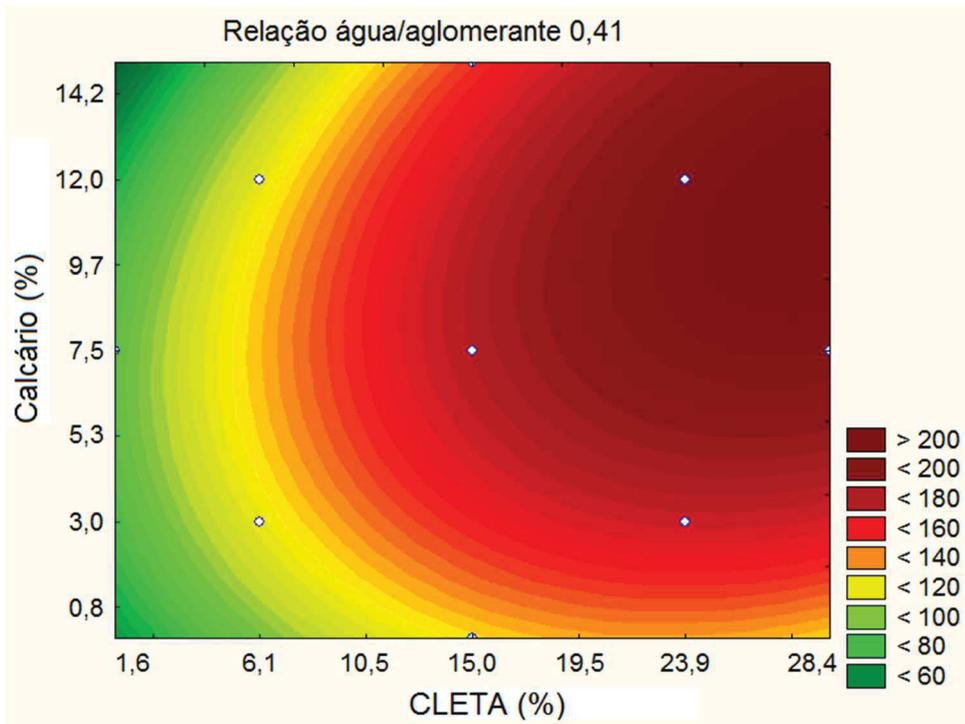


Fonte: Software Statistica.

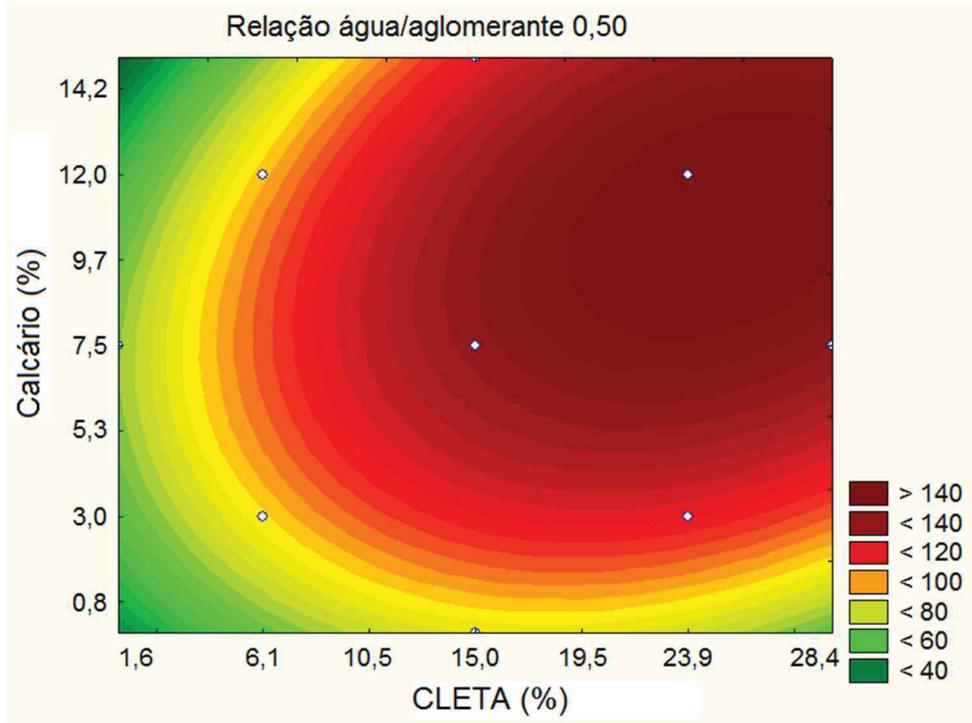
Figura 43 - Contornos da superfície de resposta da resistividade elétrica aos 91 dias para as relações água/aglomerante 0,35 (a); 0,41 (b); 0,50 (c); 0,59 (d) e 0,65 (e).



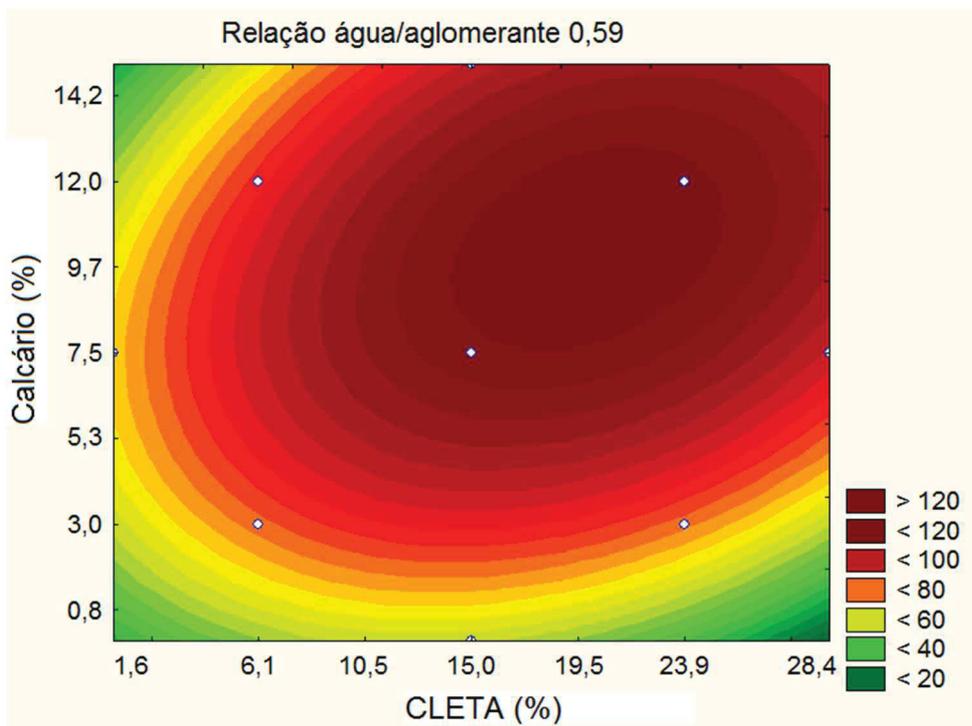
(a)



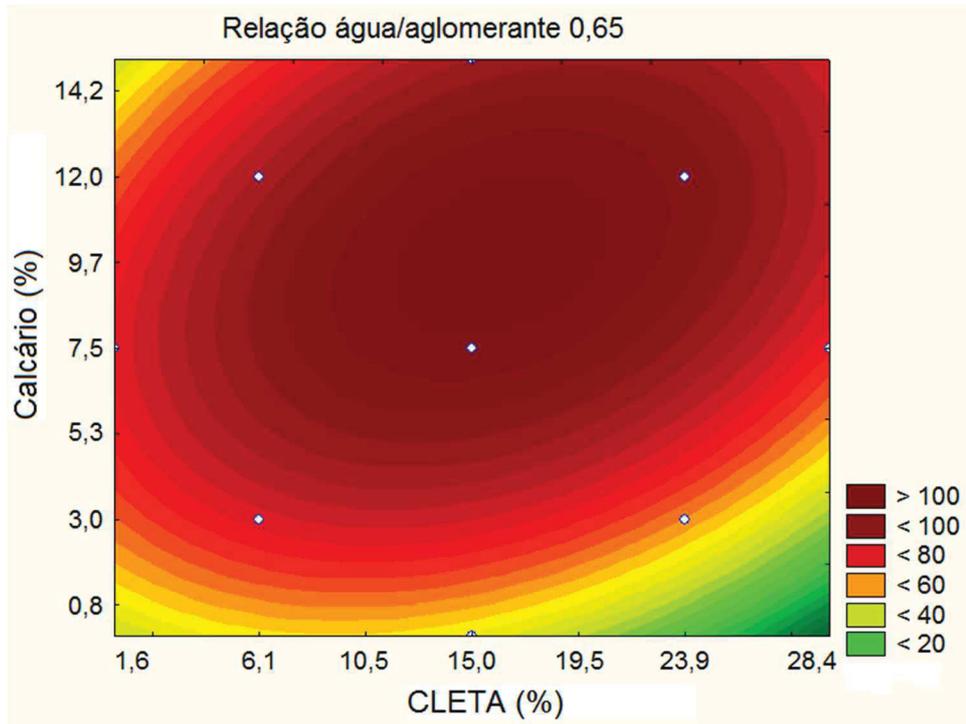
(b)



(c)



(d)



Fonte: Software Statistica.

Assim como para os 56 dias, o fator interação CLETA (linear) x Relação a/agl (linear) foi considerado significativo pelo diagrama de Pareto (Figura 42), com efeito estimado negativo. Isso é observado nos contornos da superfície de resposta pelo deslocamento da região de máxima resistividade do máximo teor de CLETA (30%) para próximo ao teor médio com o aumento da relação a/agl. O fator interação CLETA (linear) x Calcário (linear) também foi considerado significativo nesta idade, com efeito estimado positivo, o que indica que maiores teores de substituição de ambas as adições minerais foram benéficos para a resistividade elétrica aos 91 dias.

Os efeitos estimados positivos dos fatores CLETA (linear) e calcário (linear) podem ser observados por meio dos índices de resistividade elétrica ( $I_p$ ), mostrados na Tabela 20. De maneira geral, os traços com elevados teores de adição mineral alcançaram valores de  $I_p$  altos, o que indica valores de resistividade elétrica bem superiores aos dos seus traços de referência. Para cada relação a/agl observou-se também que os maiores valores de resistividade elétrica nesta idade foram aqueles dos traços com elevado teor de substituição na proporção 2:1 de CLETA e calcário.

Tabela 20 - Valores médios corrigidos de resistividade elétrica aparente ( $\rho_{\text{corrigidos}}$ ) e índices de resistividade elétrica ( $I_p$ ) aos 91 dias.

Traço	Variáveis			Resistividade elétrica aparente corrigida $\rho_{\text{corrigida}} (\Omega.m)$	$I_p$
	CLETA (%)	Calcário (%)	Relação a/agl		
REF 0,35	0,0	0,0	0,35	112,94	1,00
REF 0,41	0,0	0,0	0,41	109,10	1,00
REF 0,50	0,0	0,0	0,50	100,27	1,00
REF 0,59	0,0	0,0	0,59	87,64	1,00
REF 0,65	0,0	0,0	0,65	76,89	1,00
1	6,1	3,0	0,41	106,83	0,98
2	23,9	3,0	0,41	177,78	1,63
3	23,9	12,0	0,41	204,05	1,87
4	6,1	12,0	0,41	116,28	1,07
5	6,1	3,0	0,59	78,52	0,90
6	23,9	3,0	0,59	80,56	0,92
7	23,9	12,0	0,59	130,67	1,49
8	6,1	12,0	0,59	79,79	0,91
9	0,0	7,5	0,50	85,22	0,85
10	30,0	7,5	0,50	124,85	1,25
11	15,0	0,0	0,50	87,00	0,87
12	15,0	15,0	0,50	112,17	1,12
13	15,0	7,5	0,35	213,03	1,89
14	15,0	7,5	0,65	103,19	1,34
15	15,0	7,5	0,50	139,45	1,39
16	15,0	7,5	0,50	136,88	1,37
17	15,0	7,5	0,50	138,33	1,38

Para esta idade, novamente observou-se a existência de um ponto de máximo tanto para a CLETA quanto para o calcário (fatores quadráticos negativos). Para a CLETA, esse teor tende a ocorrer para os teores máximos desta variável (30%) para a relação a/agl 0,35. Em relação ao calcário, o teor máximo ocorreu para teores em torno de 10% em todas as relações a/agl.

Nesta idade, o efeito estimado positivo do fator relação a/agl (quadrático) indica a existência de um ponto de mínimo, que parece ocorrer na relação a/agl máxima (0,65). Além do mais, observou-se que o efeito do fator relação a/agl (linear) foi de fato o mais significativo para os 91 dias, conforme indicado pelo diagrama de Pareto,

por meio da expressiva redução do pico da região de máxima resistividade elétrica com o aumento da relação a/agl. Tomando como referência novamente os Traços 13, 14 e ponto central (média dos resultados dos Traços 15, 16 e 17), a resistividade elétrica do ponto central sofreu redução de 35,1% em relação à do Traço 13 e a do Traço 14, de 25,3% em relação ao valor médio do ponto central. Estas foram as maiores reduções observadas de todas as idades analisadas.

Por fim, na Tabela 21 constam os pvalores de cada fator e os coeficientes de regressão das equações do modelo matemático de todas as idades. O coeficiente de regressão de um certo fator analisado é considerado significativo caso o pvalor encontrado seja menor que o nível de significância ( $\alpha$ ) adotado. Os coeficientes de regressão significativos, apresentados na Tabela 21 correspondem aos mesmos fatores significativos apontados pelo diagrama de Pareto para cada idade. Como as superfícies de resposta foram geradas considerando a influência dos fatores com efeitos estimados menores (que não foram considerados significativos), então a equação para cada modelo levou em conta todos os coeficientes de regressão de cada idade.

Tabela 21 - Coeficientes de regressão (linear e quadráticos) e pvalores para cada idade.

Coeficientes de regressão (linear e quadráticos) e pvalores para cada idade

Fator	Idade									
	7 dias		14 dias		28 dias		56 dias		91 dias	
	CR	pvalor	CR	pvalor	CR	pvalor	CR	pvalor	CR	pvalor
Média	44,91	0,00	76,83	0,00	108,38	0,00	124,73	0,00	138,11	0,00
CLETA (L)	-12,49	0,00	-9,64	0,00	0,36	0,89	10,46	0,01	20,55	0,00
CLETA (Q)	-3,15	0,02	-11,27	0,00	-15,11	0,00	-13,30	0,00	-11,37	0,01
Calcário (L)	0,28	0,78	2,07	0,23	2,90	0,28	7,25	0,03	9,64	0,02
Calcário (Q)	-3,49	0,01	-7,06	0,00	-10,13	0,01	-9,99	0,01	-13,30	0,01
Relação a/agl (L)	-1,41	0,19	-3,86	0,04	-10,56	0,00	-20,81	0,00	-30,93	0,00
Relação a/agl (Q)	-1,11	0,33	-1,84	0,32	-0,24	0,93	2,45	0,44	7,41	0,07
CLETA x Calcário (L)	-1,34	0,32	0,11	0,96	1,21	0,72	3,00	0,43	7,93	0,09
CLETA x a/agl (L)	2,36	0,10	4,18	0,08	-0,22	0,95	-8,71	0,04	-12,95	0,02
Calcário x a/agl (L)	1,19	0,37	2,30	0,30	3,68	0,29	3,51	0,36	2,23	0,60

CR: Coeficiente de Regressão (L) Linear e (Q) Quadrático.

As equações apresentadas abaixo representam o modelo matemático para cada idade. A Equação 7 refere-se aos 7 dias, a Equação 8 aos 14 dias, e a Equação 9 aos 28 dias. O modelo matemático descrito pela Equação 10 refere-se aos 56 dias e pela Equação 11, aos 91 dias.

$$\begin{aligned} \rho_{7 \text{ dias}} = & 44,91 - 12,49.x_1 - 3,15.x_1^2 + 0,28.x_2 - 3,49.x_2^2 - 1,41.x_3 \\ & - 1,11.x_3^2 - 1,34.x_1.x_2 + 2,36.x_1.x_3 + 1,19.x_2.x_3 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \rho_{14 \text{ dias}} = & 76,83 - 9,64.x_1 - 11,27.x_1^2 + 2,07.x_2 - 7,06.x_2^2 - 3,86.x_3 \\ & - 1,84.x_3^2 + 0,11.x_1.x_2 + 4,18.x_1.x_3 + 2,30.x_2.x_3 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \rho_{28 \text{ dias}} = & 108,38 + 0,36.x_1 - 15,11.x_1^2 + 2,90.x_2 - 10,13.x_2^2 - 10,56.x_3 \\ & - 0,24.x_3^2 + 1,21.x_1.x_2 - 0,22.x_1.x_3 + 3,68.x_2.x_3 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \rho_{56 \text{ dias}} = & 124,73 + 10,46.x_1 - 13,30.x_1^2 + 7,25.x_2 - 9,90.x_2^2 - 20,81.x_3 \\ & + 2,45.x_3^2 + 3,00.x_1.x_2 - 8,71.x_1.x_3 + 3,51.x_2.x_3 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \rho_{91 \text{ dias}} = & 138,11 + 20,55.x_1 - 11,37.x_1^2 + 9,64.x_2 - 13,30.x_2^2 - 30,93.x_3 \\ & + 7,41.x_3^2 + 7,93.x_1.x_2 - 12,95.x_1.x_3 + 2,23.x_2.x_3 \end{aligned} \quad (11)$$

A partir do exposto no decorrer do item 5.1.1, alguns comportamentos acerca das três variáveis da pesquisa (CLETA, calcário e relação a/agl) puderam ser avaliados.

As análises feitas acerca da CLETA indicam que houve uma transição de efeito sobre a resistividade elétrica aos 28 dias. Nas idades iniciais, maiores teores de substituição parecem ser prejudiciais devido, principalmente, ao efeito de diluição e, depois dos 28 dias, parecem exercer um efeito positivo sobre a resistividade elétrica. De acordo com Zuo e Wei (2015), quando grandes quantidades de produtos de hidratação são produzidas, a resistividade aumenta rapidamente. Como o efeito estimado do fator CLETA (linear) foi maior a cada idade (mesmo tendo efeito estimado

negativo nas idades iniciais), é possível que as reações pozolânicas da CLETA tenham formado quantidades elevadas de produtos de hidratação (secundários) desde as idades iniciais, o que resultou em consumo de portlandita. Tashiro, Ikeda e Inoue (1994) observaram uma relação linear entre a resistividade elétrica e o consumo normalizado de portlandita, sendo que maior resistividade indicaria propriedades superiores da pozolana.

Além disso, os maiores valores de resistividade elétrica aos 91 dias para cada relação a/agl foram aqueles dos traços com CLETA e calcário na proporção 2:1 (naqueles com os maiores teores de substituição). Maiores consumos de  $\text{Ca(OH)}_2$  em amostras com misturas ternárias de metacaulim e calcário foram observadas por Antoni et al. (2012) (em comparação com misturas binárias, com apenas uma das adições), sendo que os traços com proporção 2:1 de metacaulim e calcário apresentaram os maiores consumos de portlandita.

Este efeito sinérgico da CLETA e do calcário pode ser notado também a partir dos índices de resistividade em todas as idades. Os traços que continham teores de CLETA acima de 15% apresentaram baixos índices de resistividade ( $I_p$ ) em idades iniciais, mas altos  $I_p$  aos 91 dias (com exceção do Traço 6), independente do teor de calcário. Observou-se então contribuição do calcário para a hidratação da CLETA, mesmo efeito observado para misturas contendo calcário e argila calcinada ou metacaulim em outros estudos (ANDRÉS et al., 2015; ANTONI et al., 2012; STEENBERG et al., 2011). Neles, os autores descrevem que os grãos de calcário funcionam como pontos de nucleação para a formação do C-S-H.

A importância do calcário para a resistividade elétrica pode ser observada desde as idades iniciais, já que o teor máximo de substituição de calcário indicado pelos contornos de superfície de resposta ficou em torno do ponto central em todas as idades. Este teor aumentou um pouco a partir dos 56 dias, idade em que o fator calcário (linear) passou a ser significativo e com sinal positivo. Possivelmente isso deve-se ao efeito de nucleação dos grãos de calcário para a hidratação do cimento e da CLETA.

Em todas as idades, a relação a/agl apresentou efeito estimado negativo no diagrama de Pareto, o que pode ser percebido pelas reduções na resistividade elétrica nos dados experimentais com o aumento da relação a/agl em todas as idades analisadas. Este comportamento foi observado em outros estudos (LÜBECK, 2008; ZACCARDI; DI MAIO, 2014; ZUO; WEI, 2015). Segundo Medeiros-Junior e Lima

(2016), a redução da resistividade ocorre pois maiores quantidades de água levam à maior permeabilidade e à maior condutividade no concreto. A maior permeabilidade está relacionada, principalmente, com a microestrutura do concreto, sendo que maiores relações  $a/agl$  resultam em alta porosidade capilar.

Além disso, o valor absoluto do efeito estimado do fator relação  $a/agl$  (linear) foi maior a cada idade, indicando que a influência do aumento da relação  $a/agl$  cresceu com o tempo. Esse comportamento, que está relacionado com a porosidade do concreto, foi observado por Liu et al. (2013), sendo que porosidade capilar reduzida foi alcançada com menores relações  $a/agl$  e aumento do grau de hidratação. De acordo com Van Noort, Hunger e Spiesz (2016), o teor efetivo de água de uma mistura de concreto fresco controla a resistividade do concreto endurecido, já que maiores relações  $a/agl$  resultam em frações de poros maiores.

### **5.1.2 Condutividade elétrica, potencial de Hidrogênio (pH) e concentração de íons $OH^-$ .**

Tanto a microestrutura do concreto quanto a condutividade elétrica da solução aquosa dos poros exercem influência sobre a resistividade elétrica. Neste item foi avaliado o comportamento da condutividade elétrica, do potencial de Hidrogênio (pH) e da concentração de íons  $OH^-$ , de maneira isolada e em relação à resistividade elétrica.

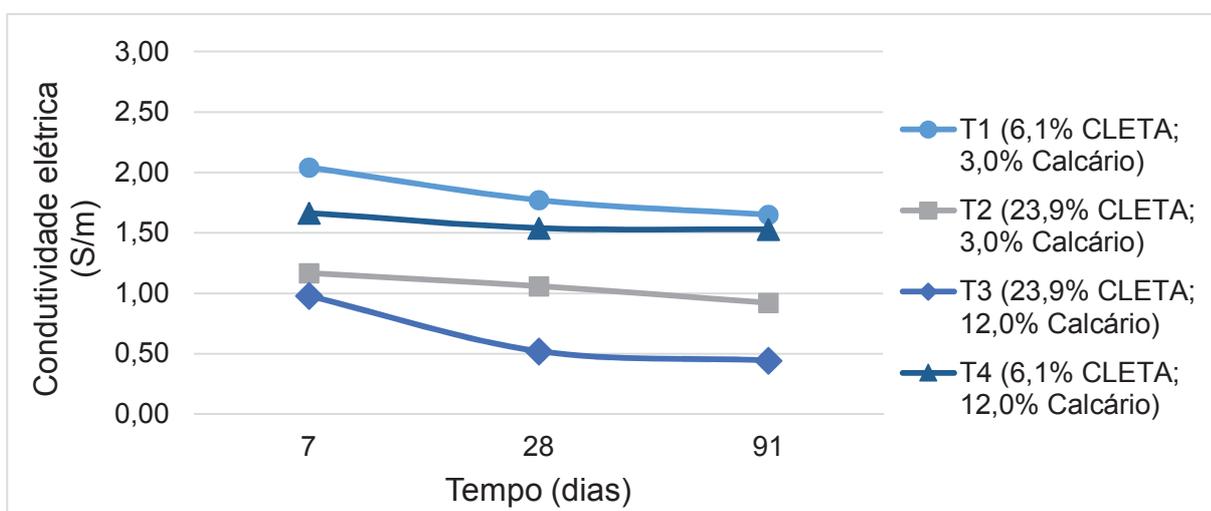
#### **5.1.2.1 Condutividade elétrica**

Conforme pode ser observado por meio da Tabela 22 e da Figura 44, a condutividade elétrica sofreu redução com o tempo, comportamento observado também por outros autores (LÜBECK, 2008; MCCARTER; STARRS; CHRISP, 2000; SALEM, 2002). Esta redução de condutividade com o tempo ocorreu devido aos íons, que foram liberados após o contato da água com o cimento começarem a reagir, formando produtos de hidratação. Isso reduziu a concentração dos íons aquosos na solução dos poros e segmentou os poros capilares pela formação do gel C-S-H. Além disso, menores valores de condutividade elétrica foram observados quando a relação  $a/agl$  aumentou devido, principalmente, a menor concentração de íons na solução aquosa dos poros.

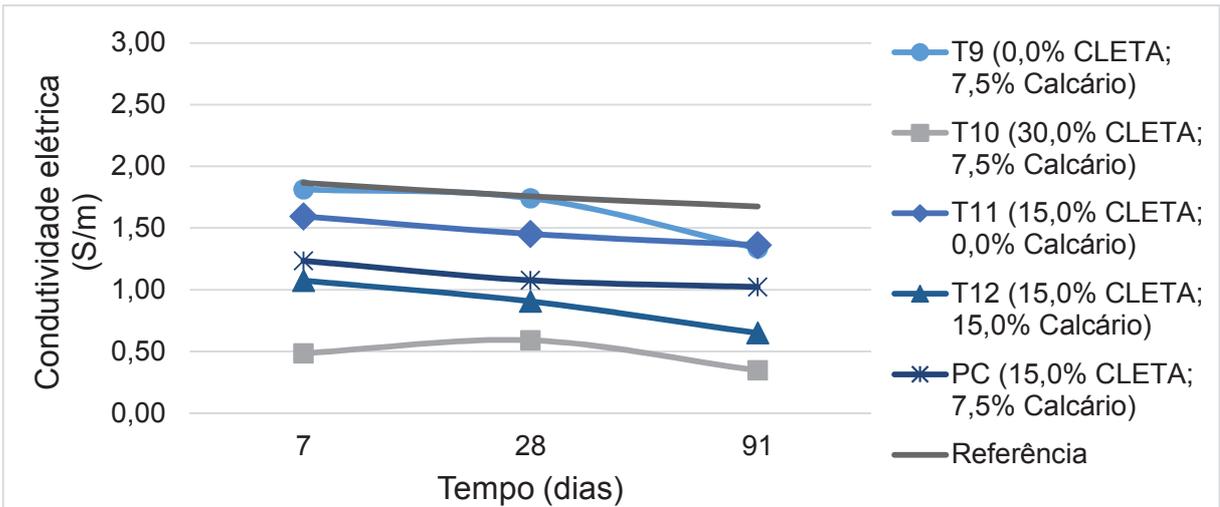
Tabela 22 – Condutividade elétrica aos 7, 28 e 91 dias.

Traço	Variáveis			Condutividade elétrica $\sigma$ (S/m)		
	CLETA (%)	Calcário (%)	Relação a/agl	7 dias	28 dias	91 dias
REF 0,35	0,0	0,0	0,35	2,83	2,61	2,45
REF 0,50	0,0	0,0	0,50	1,87	1,76	1,68
REF 0,65	0,0	0,0	0,65	1,42	1,33	1,21
1	6,1	3,0	0,41	2,04	1,77	1,65
2	23,9	3,0	0,41	1,17	1,06	0,92
3	23,9	12,0	0,41	0,98	0,52	0,44
4	6,1	12,0	0,41	1,67	1,54	1,53
5	6,1	3,0	0,59	1,43	1,31	1,13
6	23,9	3,0	0,59	1,14	0,95	0,74
7	23,9	12,0	0,59	0,88	0,70	0,44
8	6,1	12,0	0,59	1,20	0,99	0,95
9	0,0	7,5	0,50	1,81	1,74	1,34
10	30,0	7,5	0,50	0,49	0,59	0,35
11	15,0	0,0	0,50	1,60	1,45	1,36
12	15,0	15,0	0,50	1,07	0,91	0,65
13	15,0	7,5	0,35	1,47	0,94	0,67
14	15,0	7,5	0,65	1,20	1,05	0,93
15	15,0	7,5	0,50	1,23	1,06	1,01
16	15,0	7,5	0,50	1,23	1,07	1,02
17	15,0	7,5	0,50	1,25	1,10	1,04

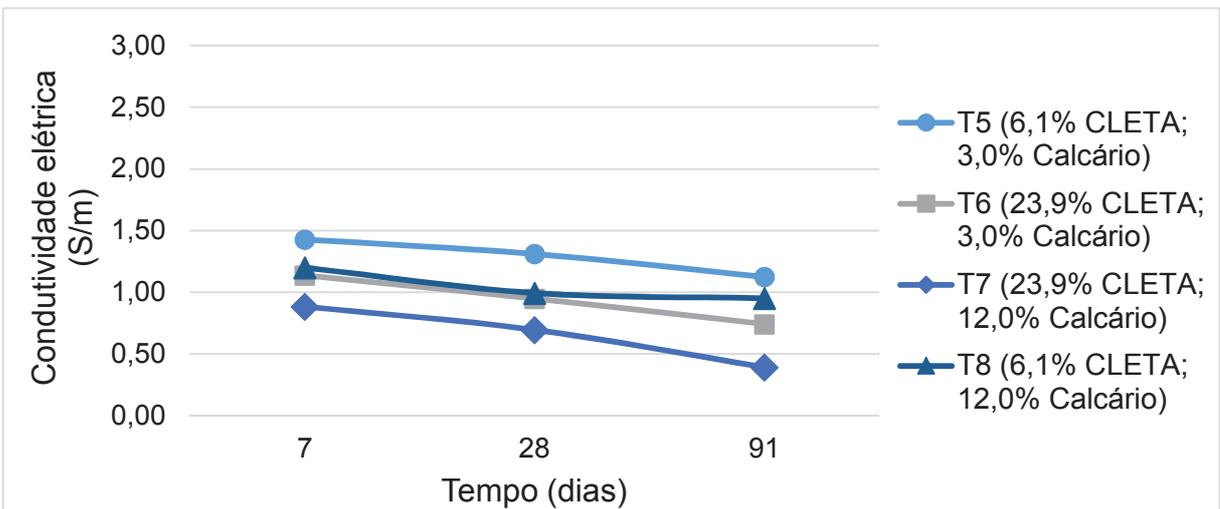
Figura 44 - Evolução da condutividade elétrica com o tempo para as relações a/agl (a) 0,41, (b) 0,50, (c) 0,59, (d) 0,35 e 0,65.



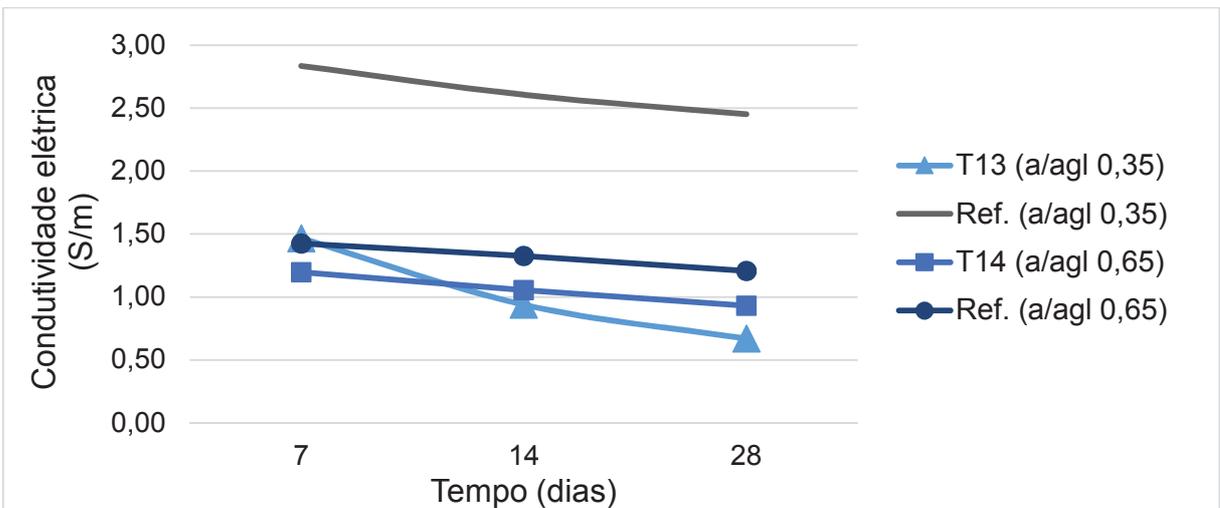
(a)



(b)



(c)



(d)

PC: ponto central

Em todas as idades, os traços com adições minerais apresentaram condutividade elétrica menor que seus traços de referência de mesma relação a/agl. Observou-se também que, de maneira geral, o aumento dos teores de adições minerais resultaram nos menores valores de condutividade elétrica em todas as idades, comportamento observado também por Topçu, Uygunoglu e Hocaoglu (2012). De acordo com Medeiros-Junior e Lima (2016) a menor condutividade observada quando o cimento possui adições minerais deve-se a diminuição dos íons  $\text{OH}^-$  na solução dos poros pelas reações pozolânicas ao longo do tempo, que produzem mais gel C-S-H e contribuem para o aumento da resistividade elétrica.

#### 5.1.2.2 Potencial de Hidrogênio (pH)

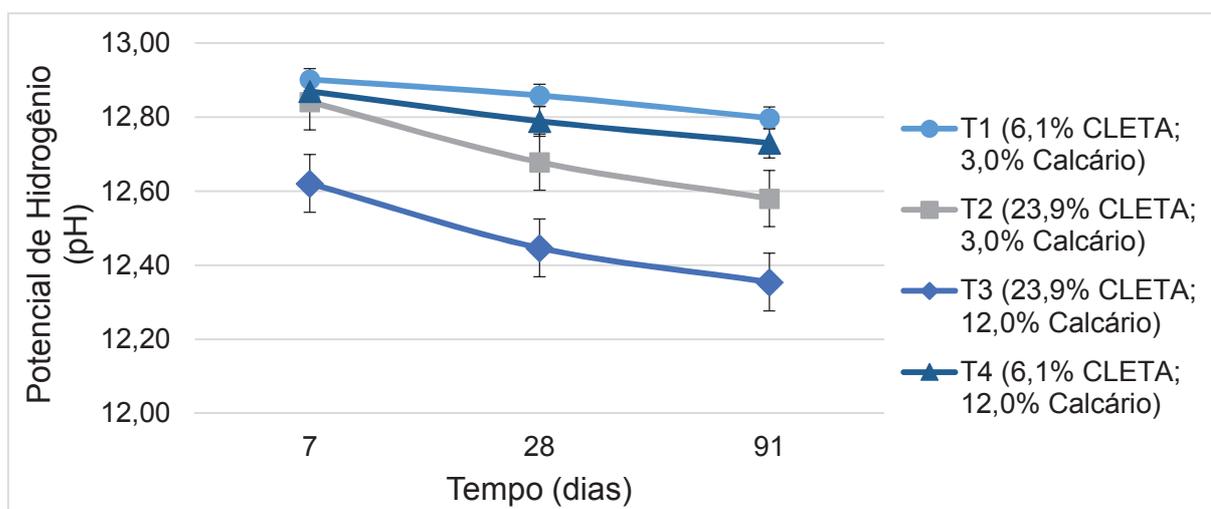
Assim como para a condutividade elétrica, redução do pH foi observada com o aumento da idade (Tabela 23 e Figura 45). Os traços com adições minerais também apresentaram os menores valores de pH em todas as idades. Essa redução pode ocorrer porque as reações pozolânicas consomem a portlandita, um dos elementos responsáveis pelo elevado pH da solução dos poros. No entanto, de acordo com Härdtl et al. (1994 apud FIGUEIREDO; MEIRA, 2011) esse decréscimo não chega a níveis que comprometam a camada de proteção do aço, permanecendo em valores superiores a 12.

O menor valor de pH observado aos 91 dias dos traços do planejamento experimental foi aquele do Traço 10 (pH=12,19), com teor total de substituição de 37,5% por CLETA e calcário e relação a/agl 0,50. Este valor foi menor que o valor mínimo de pH encontrado por Missau (2004) aos 91 dias, que foi de 12,59 para substituições de cimento por 50% de escória de alto forno e por 35% de cinza volante para relações a/agl de 0,65.

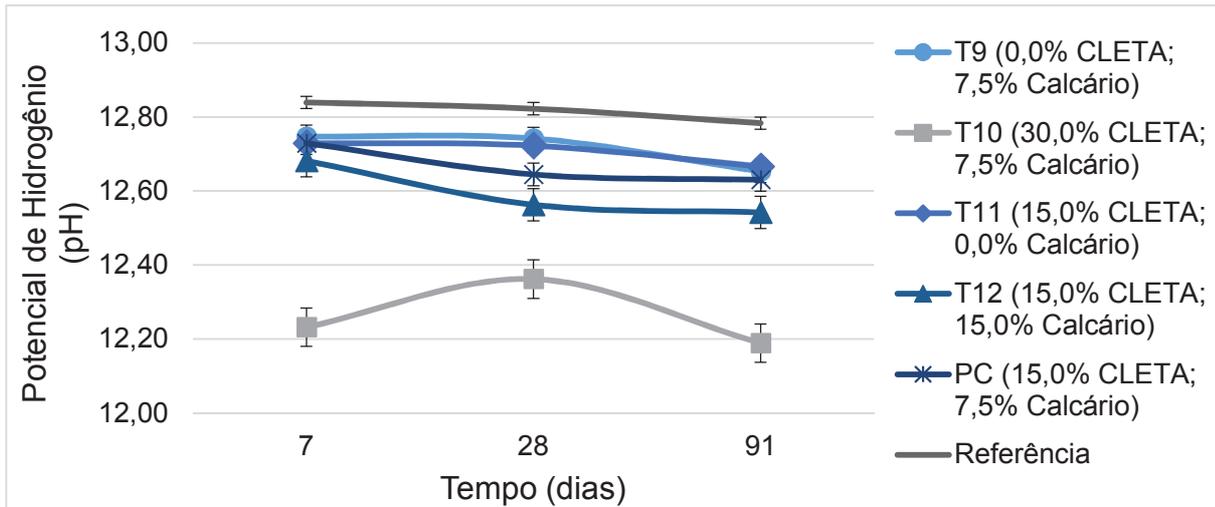
Tabela 23 - Potencial de Hidrogênio (pH) aos 7, 28 e 91 dias.

Traço	Variáveis			Potencial de Hidrogênio (pH)		
	CLETA (%)	Calcário (%)	Relação a/agl	7 dias	28 dias	91 dias
REF 0,35	0,0	0,0	0,35	12,91	12,90	12,85
REF 0,50	0,0	0,0	0,50	12,84	12,82	12,78
REF 0,65	0,0	0,0	0,65	12,71	12,66	12,56
1	6,1	3,0	0,41	12,90	12,86	12,80
2	23,9	3,0	0,41	12,84	12,68	12,58
3	23,9	12,0	0,41	12,62	12,45	12,35
4	6,1	12,0	0,41	12,87	12,79	12,73
5	6,1	3,0	0,59	12,81	12,77	12,70
6	23,9	3,0	0,59	12,60	12,58	12,57
7	23,9	12,0	0,59	12,44	12,43	12,34
8	6,1	12,0	0,59	12,77	12,63	12,57
9	0,0	7,5	0,50	12,75	12,74	12,65
10	30,0	7,5	0,50	12,23	12,36	12,19
11	15,0	0,0	0,50	12,73	12,72	12,67
12	15,0	15,0	0,50	12,68	12,56	12,54
13	15,0	7,5	0,35	12,70	12,67	12,64
14	15,0	7,5	0,65	12,56	12,53	12,43
15	15,0	7,5	0,50	12,72	12,63	12,61
16	15,0	7,5	0,50	12,73	12,65	12,63
17	15,0	7,5	0,50	12,74	12,66	12,64

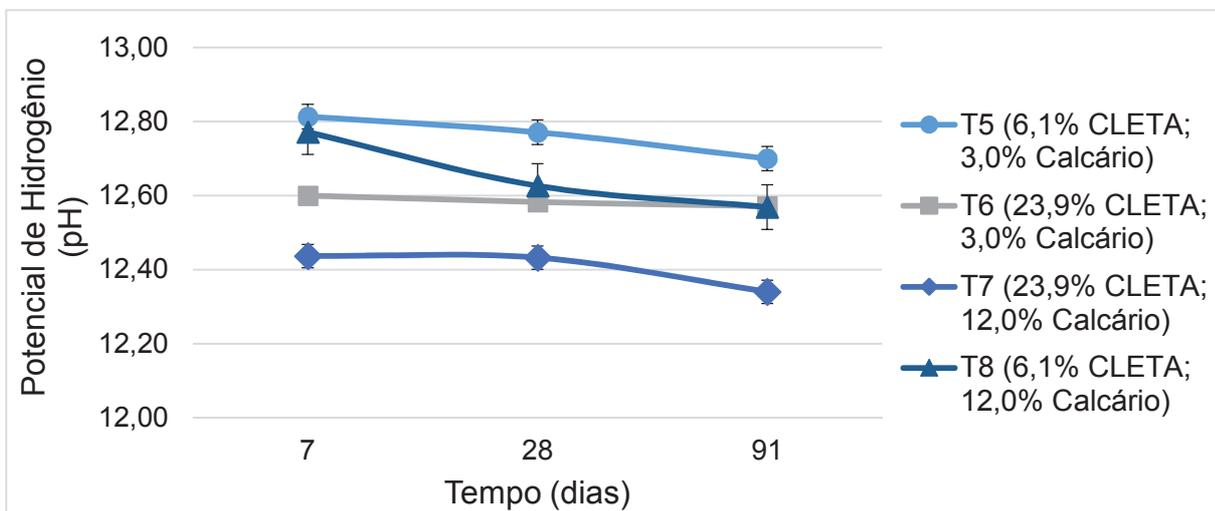
Figura 45 - Evolução do pH com o tempo para as relações a/agl (a) 0,41, (b) 0,50, (c) 0,59, (d) 0,35 e 0,65.



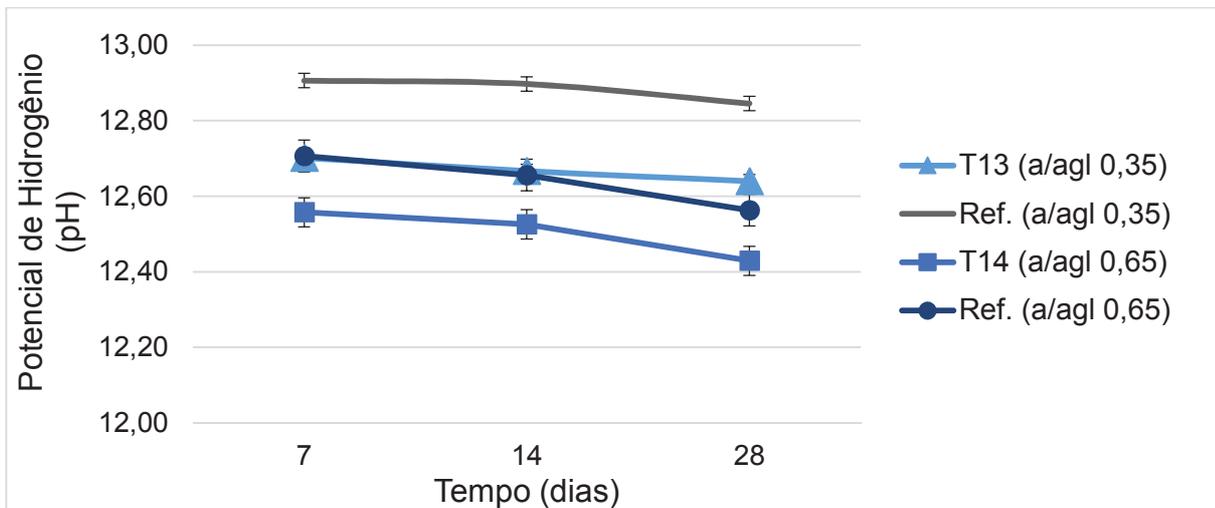
(a)



(b)



(c)



(d)

PC: ponto central

Tanto pela análise da evolução da condutividade elétrica (Figura 44) quanto do pH (Figura 45), observou-se que o Traço 10 apresentou aumento nestas duas propriedades dos 7 aos 28 dias e redução aos 91 dias. Baixa resistividade elétrica também foi observada neste traço aos 7 dias, com evolução lenta até os 28 dias e crescimento acima daquele do traço de referência aos 91 dias. Embora sejam necessários ensaios complementares para explicar o que pode ter provocado este comportamento, pode-se inferir que menores valores de pH e de condutividade elétrica foram resultado da menor liberação de íons na solução dos poros quando a água entrou em contato com os grãos anidros do cimento, devido ao efeito da diluição. Isso resultou em menor quantidade de produtos de hidratação aos 7 dias e, conseqüentemente, menor resistividade. A elevação do pH e da condutividade aos 28 dias indicou que mais íons foram liberados na solução (liberação tardia). A nova redução do pH aos 91 dias indica que as reações pozolânicas consumiram a portlandita, formando produtos de hidratação secundários, que reduziram a porosidade capilar do concreto e resultaram no aumento da resistividade elétrica.

#### 5.1.2.3 Interação dos resultados

Neste item são feitas comparações entre os resultados de resistividade elétrica, condutividade elétrica e concentração de íons  $\text{OH}^-$  (obtida a partir dos resultados de pH) para os 91 dias. As relações lineares foram feitas para os traços com, pelo menos, 2 relações  $a/\text{agl}$ , embora todos os pontos dos traços analisados apareçam no gráfico.

A relação entre resistividade e condutividade elétrica apresentada na Figura 46 relaciona traços com mesmo teor de substituição de CLETA e calcário, mas com relações  $a/\text{agl}$  diferentes. Aos 91 dias, observou-se crescimento tanto da condutividade quanto da resistividade elétrica quando a relação  $a/\text{agl}$  foi reduzida. Este comportamento, observado em estudos anteriores com outros tipos de cimento e adições minerais (HOPPE, 2005; LÜBECK, 2008; ROSA, 2005) é resultado da maior concentração iônica na solução dos poros quando a relação  $a/\text{agl}$  é reduzida. A redução da relação  $a/\text{agl}$  resulta, no entanto, em maiores valores de resistividade elétrica devido às alterações na microestrutura pela formação de mais produtos de hidratação e seccionamento dos poros capilares, razão pela qual o efeito da resistividade elétrica se sobrepõe ao efeito da condutividade elétrica.



Figura 47 - Resistividade elétrica versus concentração de íons OH<sup>-</sup> aos 91 dias.

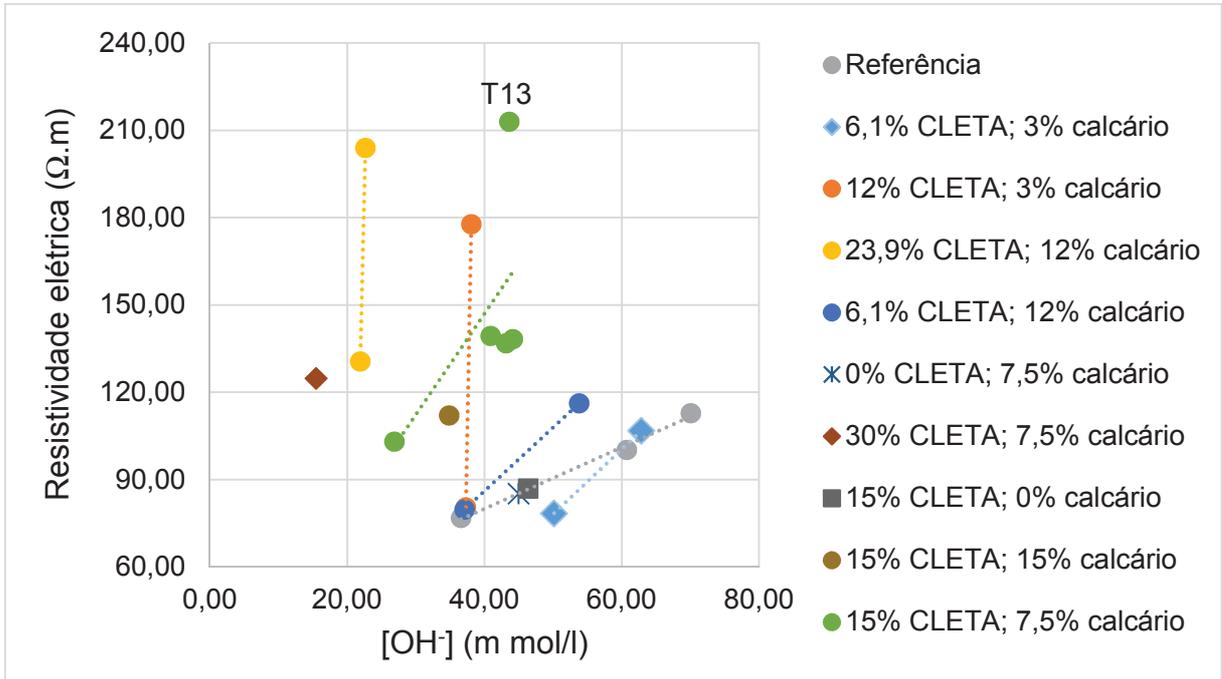
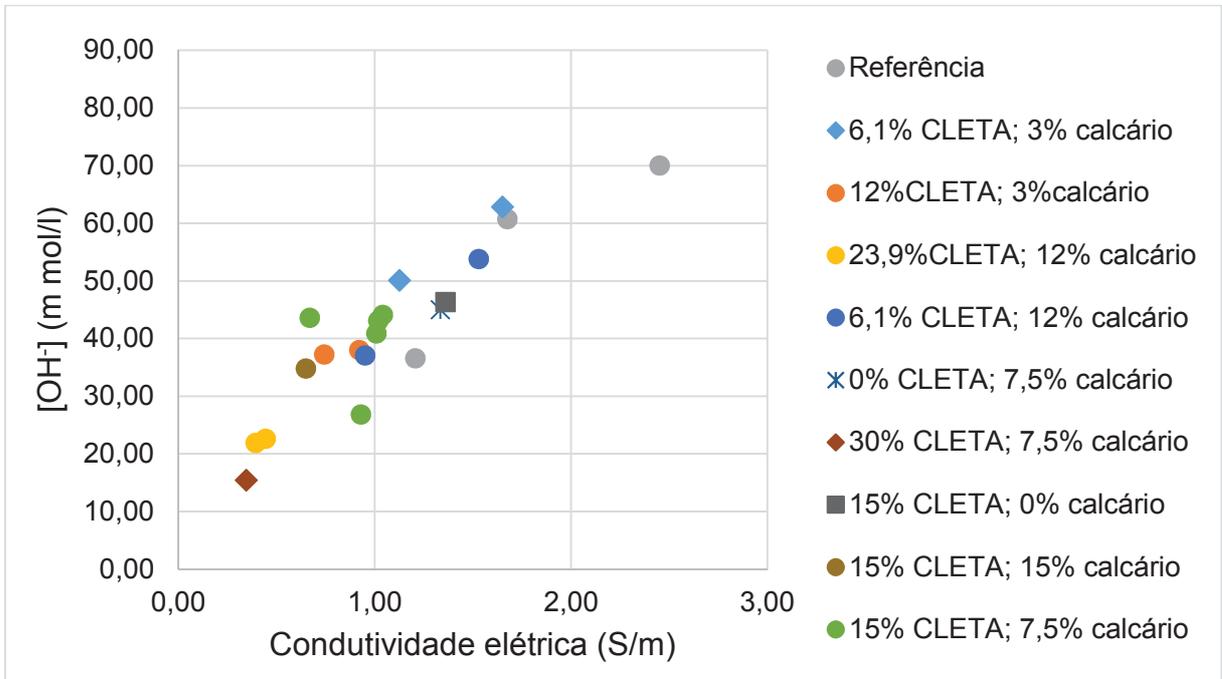


Figura 48 - Concentração de íons OH<sup>-</sup> versus condutividade elétrica aos 91 dias.



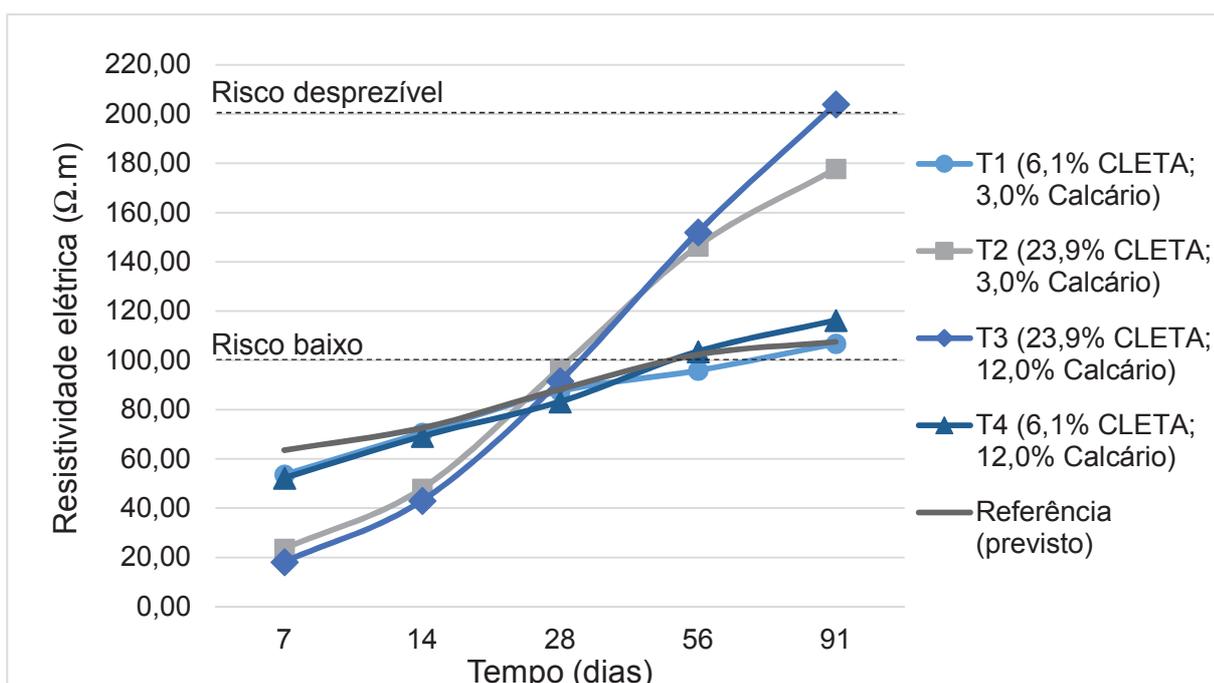
## 5.2 AVALIAÇÃO DO RISCO DE CORROSÃO

Um dos objetivos da medição da resistividade elétrica de estruturas de concreto armado é a avaliação do risco de corrosão ao qual a armadura embutida no concreto está sujeita. Por isso, neste item foi feita avaliação do risco de corrosão de acordo com limites indicados pelo CEB 192 (Figura 1, pag. 20). Três avaliações foram feitas: para os traços do planejamento experimental; daqueles calculados a partir das equações dos modelos matemáticos para os 28 e 91 dias em relação às classes de agressividade estabelecidas pela NBR 12655 (ABNT, 2015); e a partir de classes de resistência mecânica por meio da curva de Abrams.

### 5.2.1 Traços do planejamento experimental

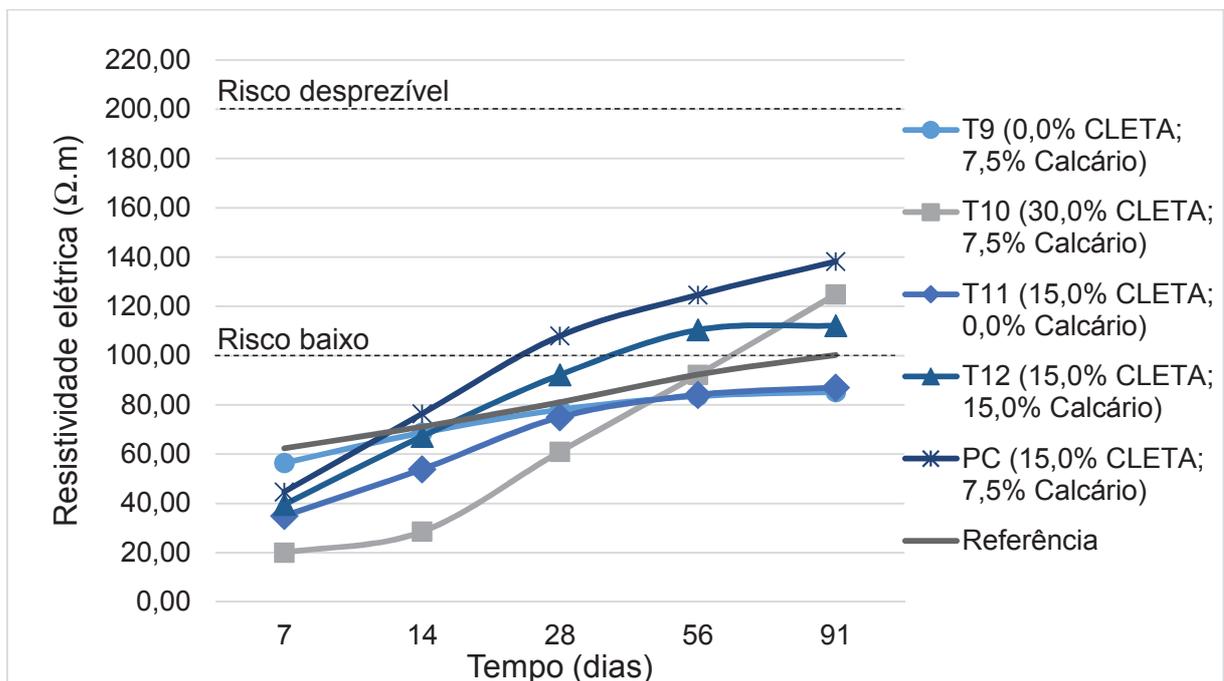
Nas Figuras 49 a 52 consta a evolução da resistividade elétrica com o tempo dos traços do planejamento experimental. De acordo com o apresentado na Figura 49, todos os traços com relação água/aglomerante 0,41 atingiram risco de corrosão baixo aos 91 dias e o Traço 3, risco desprezível. Ademais, as maiores resistividades foram observadas nos traços com elevado teor de CLETA para esta relação a/agl.

Figura 49 – Risco de corrosão para os traços com relação a/agl 0,41.



A partir do observado na Figura 50, constatou-se que nenhum traço com relação a/agl 0,50 atingiu o nível de risco desprezível de corrosão nas idades analisadas. Os Traços 9 e 11, que eram misturas binárias, nem atingiram o nível de risco baixo aos 91 dias. Os traços do ponto central, com 15% de CLETA e 7,5% de calcário apresentaram a maior resistividade elétrica das relações a/agl 0,50 aos 91 dias, sendo que desde os 28 dias já apresentavam risco de corrosão baixo.

Figura 50 - Risco de corrosão para os traços com relação a/agl 0,50.



PC: ponto central

Conforme apresentado na Figura 51, o único traço que atingiu risco de corrosão baixo aos 91 dias para a relação a/agl 0,59 foi o Traço 7, que possuía elevado teor de CLETA e calcário. Os demais traços apresentaram risco alto de corrosão em todas as idades.

A partir da Figura 52 observou-se que o Traço 13 foi aquele com maior resistividade elétrica aos 91 dias, atingindo risco de corrosão baixo desde os 28 dias e, aos 91 dias, risco desprezível. O Traço 14, no entanto, com a maior relação a/agl dos traços do planejamento experimental, alcançou o limite de risco baixo somente aos 91 dias.

Figura 51 - Risco de corrosão para os traços com relação a/agl 0,59.

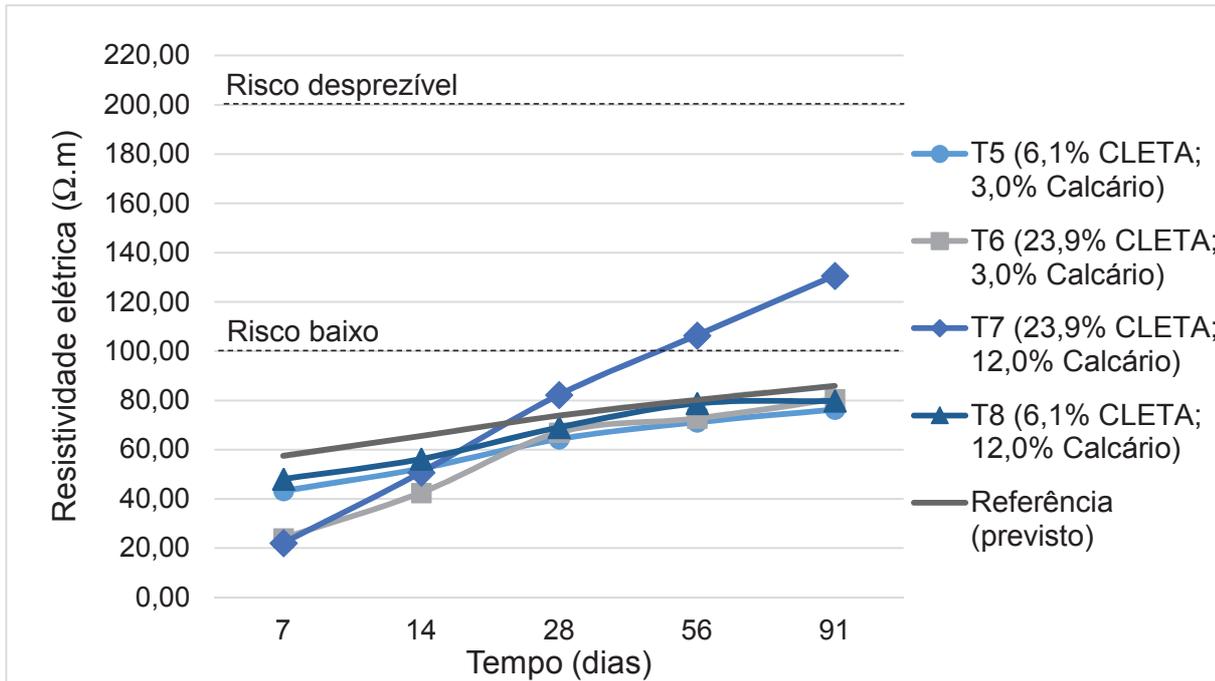
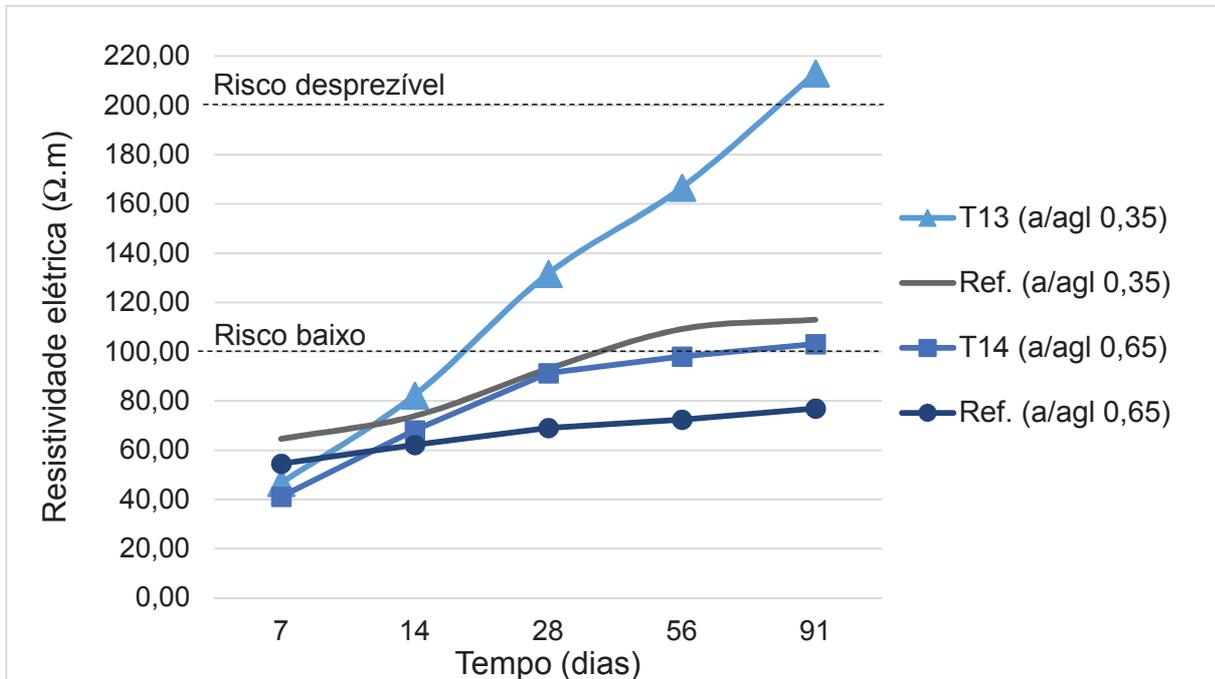


Figura 52 - Risco de corrosão para os traços com relação a/agl 0,35 e 0,65.



### 5.2.2 Traços relacionados às classes de agressividade ambiental da NBR 12655 (ABNT, 2015)

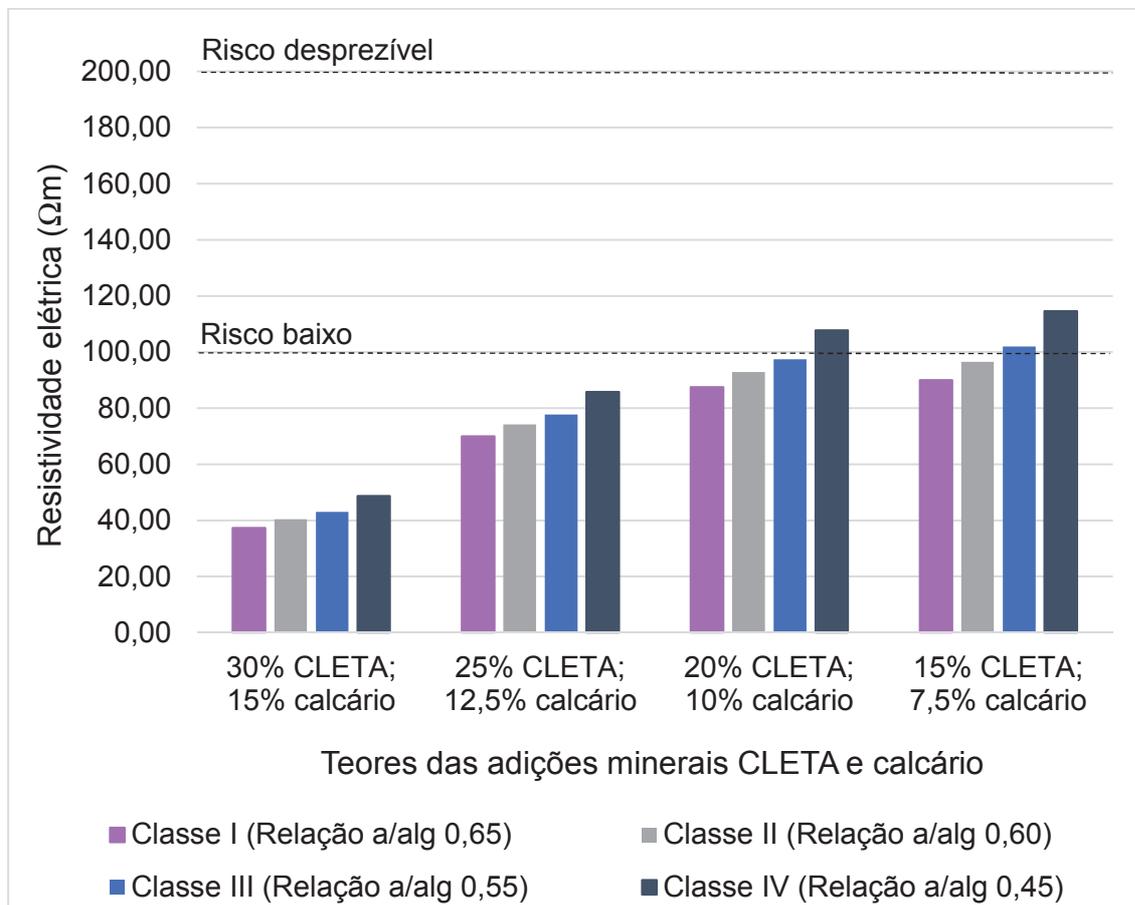
A NBR 12655 (ABNT, 2015) estabelece uma relação água/aglomerante máxima para cada classe de agressividade ambiental referente a componentes e elementos estruturais de concreto armado, sendo que o risco de deterioração da estrutura aumenta da classe I à IV:

- Classe de agressividade I (fraca): relação  $a/agl \leq 0,65$ ;
- Classe de agressividade II (moderada): relação  $a/agl \leq 0,60$ ;
- Classe de agressividade III (forte): relação  $a/agl \leq 0,55$ ;
- Classe de agressividade IV (muito forte): relação  $a/agl \leq 0,45$ .

De acordo a análise feita no item 5.1.1, bons resultados de resistividade elétrica foram obtidos para altos teores de substituição de CLETA em idades mais avançadas e para baixas relações  $a/agl$ . Ademais, para cada relação  $a/agl$  as maiores resistividades elétricas foram observadas nos traços com altos teores de substituição de adições minerais e em proporção 2:1 de CLETA e calcário, especialmente aos 91 dias. Deste modo, a partir das equações do modelo matemático para os 28 e 91 dias, (Equação 9 e Equação 11, respectivamente – pag. 112), foram calculadas quais as resistividades elétricas alcançadas nestas duas idades com as relações  $a/agl$  máximas de cada classe de agressividade ambiental. Os teores adotados foram de 15% a 30% de CLETA e 7,5% a 15% de calcário (variação a cada 5%).

Aos 28 dias (Figura 53), para todas classes de agressividade ambiental observou-se aumento da resistividade elétrica com a redução tanto dos teores totais de substituição quanto das relações  $a/agl$ . Os maiores valores foram observados para os teores de 15% de CLETA e 7,50% de calcário, concordando com a análise feita no item 5.1.1.3. Os traços com 25% ou 30% de CLETA (e 12,5% e 15% de calcário, respectivamente) não alcançaram o risco de corrosão baixo com nenhuma relação  $a/agl$  aos 28 dias. Para os traços com 20% de CLETA e 10% de calcário, o risco baixo foi alcançado somente com a relação  $a/agl$  0,45 e, nos traços com 15% de CLETA e 7,5% de calcário, com as relações  $a/agl$  0,55 e 0,45.

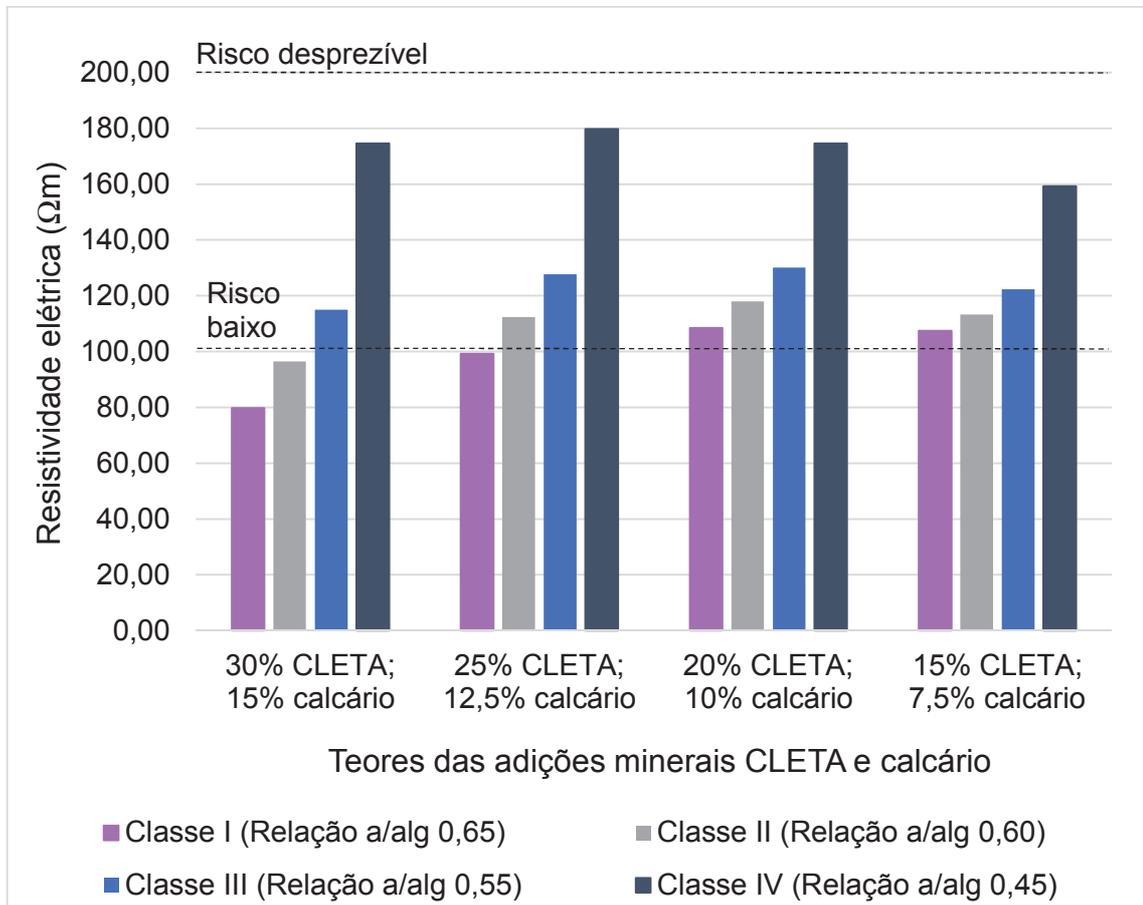
Figura 53 - Resistividade elétrica aos 28 dias para as relações a/agl máximas das classes de agressividade ambiental estabelecidas pela NBR 12655 (ABNT, 2015).



Para relações a/agl altas (0,65, 0,60 e 0,55), a mesma tendência de aumento da resistividade elétrica com a redução tanto dos teores totais de substituição quanto das relações a/agl foi observada aos 91 dias para teores de substituição de até 20% de CLETA e 10% de calcário. Para os teores de 15% de CLETA e 7,5% de calcário observou-se leve redução de resistividade elétrica para estas relações a/agl (Figura 54).

Nenhum traço atingiu risco de corrosão desprezível aos 91 dias, embora elevados valores de resistividade elétrica tenham sido calculados para a relação a/agl 0,45, principalmente para teores de substituição de 25% e 30% de CLETA e de 12,5% e 15% de calcário, respectivamente, em conformidade com o comportamento observado na análise feita no item 5.1.1.

Figura 54 - Resistividade elétrica aos 91 dias para as relações a/agl máximas das classes de agressividade ambiental estabelecidas pela NBR 12655 (ABNT, 2015)



Além disso, risco de corrosão baixo foi alcançado aos 91 dias para todas as classes de agressividade ambiental nos traços com 20% de CLETA e 10% de calcário e nos traços com 15% de CLETA e 7,5% de calcário.

Vale salientar que, embora concretos com altas relações a/agl possam apresentar altos valores de resistividade elétrica e risco baixo de corrosão (de acordo com a classificação proposta pelo CEB 192, a durabilidade pode não ser satisfatória. Isso porque altas relações a/agl são relacionadas a elevada penetrabilidade.

### 5.2.3 Traços de acordo com classes de resistência mecânica

No APÊNDICE A (Tabela 30) constam os resultados de resistência mecânica obtidos no trabalho que acontece de maneira paralela a este, conduzido pela doutoranda Sabrina Hagemann, pertencente ao grupo de pesquisas GEPECON. Na

presente pesquisa não foi apresentada a análise acerca de resistência mecânica, mas sim a avaliação do risco de corrosão e da economia de cimento que pode-se obter com a substituição de 15% de CLETA e 7,5% de calcário para certas classes de resistência mecânica. Estes teores de substituição foram os que apresentaram melhor desempenho de resistência mecânica aos 28 dias de acordo com o trabalho supracitado. Foram os dados experimentais desta idade os adotados como base para o cálculo das relações  $a/agl$  e consumo de cimento. Adotou-se uma análise de redução de consumo de cimento/m<sup>3</sup> e não de custos/m<sup>3</sup> (R\$/m<sup>3</sup>) devido à dificuldade de mensurar os custos para a produção da CLETA.

Na Tabela 24 constam os valores experimentais de resistência mecânica aos 28 dias ( $f_{c28}$ ), resistividade elétrica aos 28 ( $\rho_{28}$ ) e 91 ( $\rho_{91}$ ) dias e consumo de materiais para os traços de referência e com substituição do cimento Portland por 15% de CLETA e 7,5% de calcário. A partir deles foi definida a equação da curva de Abrams para cada uma destas 3 propriedades.

Tabela 24 – Dados experimentais de resistência mecânica ( $f_{c28}$ ), resistividade elétrica ( $\rho_{28}$  e  $\rho_{91}$ ) e consumo de materiais.

Traço	Relação $a/agl$	$f_{c28}$ (MPa)	$\rho_{28}$ ( $\Omega.m$ )	$\rho_{91}$ ( $\Omega.m$ )	Consumo de materiais (kg/m <sup>3</sup> )		
					Cimento	CLETA	Calcário
REF	0,35	78,37	93,06	112,94	481,51	-	-
	0,50	41,06	81,06	100,27	356,08	-	-
	0,65	30,99	69,00	76,89	282,51	-	-
15% CLETA 7,5% Calcário	0,35	75,11	131,68	213,03	373,17	72,23	36,11
	0,50	56,61	107,94	138,22	275,96	53,41	26,71
	0,65	36,20	91,40	103,19	218,95	42,38	21,19

As equações da curva de Abrams definidas a partir dos dados constantes na Tabela 24, bem como os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) são apresentados nas Tabelas 25 e 26. A partir destas equações foram calculadas as relações água/aglomerante, resistividade elétrica ( $\rho_{28}$ ) e consumo de materiais (em kg/m<sup>3</sup>) para determinadas classes de resistência mecânica aos 28 dias ( $S_d = 4\text{MPa}$ ). Estes dados constam na Tabela 27.

Tabela 25 – Equações da curva de Abrams e valores de  $R^2$  para resistência mecânica ( $f_{c28}$ ) e resistividade elétrica ( $\rho_{28}$  e  $\rho_{91}$ ).

Traço	$f_{c28}$	$\rho_{28}$	$\rho_{91}$
Referência	$f_c = \frac{217,696}{22,0394^{a/agl}}$	$\rho = \frac{132,416}{2,7099^{a/agl}}$	$\rho = \frac{181,246}{3,6026^{a/agl}}$
	$R^2 = 0,975$	$R^2 = 0,999$	$R^2 = 0,977$
15% CLETA 7,5% Calcário	$f_c = \frac{180,871}{11,3908^{a/agl}}$	$\rho = \frac{200,520}{3,3772^{a/agl}}$	$\rho = \frac{484,790}{11,2030^{a/agl}}$
	$R^2 = 0,992$	$R^2 = 0,999$	$R^2 = 0,994$

Tabela 26 – Equações da curva de Abrams e valores de  $R^2$  para o consumo de materiais (C).

Traço	Consumo de materiais (C)		
	Cimento	CLETA	Calcário
Referência	$C_{\text{cimento}} = \frac{886,501}{5,9142^{a/agl}}$	-	-
	$R^2 = 0,997$	-	-
15% CLETA 7,5% Calcário	$C_{\text{cimento}} = \frac{687,038}{5,9142^{a/agl}}$	$C_{\text{CLETA}} = \frac{132,975}{5,9142^{a/agl}}$	$C_{\text{calcário}} = \frac{66,488}{5,9142^{a/agl}}$
	$R^2 = 0,997$	$R^2 = 0,997$	$R^2 = 0,997$

Tabela 27 - Relações água/aglomerante, resistividade elétrica ( $\rho_{28}$ ) e consumo de materiais (em  $\text{kg/m}^3$ ) de acordo com classes de resistência mecânica aos 28 dias ( $f_{c28}$ ).

Traço	$f_{c_k}$ (MPa)	$f_{c28}$ (MPa)	Relação a/agl	$\rho_{28}$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	Consumo de materiais ( $\text{kg/m}^3$ )		
					Cimento	CLETA	Calcário
Referência	30	36,6	0,58	74,53	318,18	-	-
	40	46,6	0,50	80,57	365,56	-	-
	50	56,6	0,44	85,78	408,77	-	-
	60	66,6	0,38	90,39	448,83	-	-
	70	76,6	0,34	94,56	486,40	-	-
15% CLETA	30	36,6	0,66	90,16	213,82	41,38	20,69
	40	46,6	0,56	101,74	255,08	49,37	24,69
	50	56,6	0,48	112,14	294,01	56,91	28,45
7,50% calcário	60	66,6	0,41	121,65	331,12	64,09	32,04
	70	76,6	0,35	130,46	366,75	70,98	35,49

Por meio da Tabela 28 observou-se que, nos traços com substituição de cimento por um teor total de 22,5% de adições minerais, o acréscimo de resistividade elétrica pode variar de cerca de 21% a 38% e a economia de cimento ser superior a 100 kg/m<sup>3</sup> em relação ao traço de referência de mesma resistência mecânica.

Tabela 28 - Acréscimo de resistividade elétrica e economia de cimento e aos 28 dias com substituição de cimento por 15% de CLETA e 7,5% de calcário.

<b>f<sub>ck</sub></b> <b>(MPa)</b>	<b>f<sub>c28</sub></b> <b>(MPa)</b>	<b>Acréscimo de</b> <b>resistividade elétrica</b>	<b>Economia de</b> <b>cimento</b> <b>(kg/m<sup>3</sup>)</b>
30	36,6	20,97%	104,36
40	46,6	26,29%	110,48
50	56,6	30,73%	114,76
60	66,6	34,57%	117,71
70	76,6	37,96%	119,65

A partir das relações a/agl calculadas aos 28 dias, verificou-se qual o risco de corrosão observado aos 91 dias (Tabela 29) de acordo com os limites indicados pela CEB 192 (Figura 1, pag.20).

Tabela 29 - Resistividade elétrica ( $\rho_{91}$ ) e risco de corrosão aos 91 dias para as relações a/agl calculadas aos 28 dias.

<b>Traço</b>	<b>Relação a/agl</b> <b>(28 dias)</b>	<b><math>\rho_{91}</math></b> <b>(<math>\Omega.m</math>)</b>	<b>Risco de</b> <b>Corrosão</b>
Referência	0,58	86,57	Alto
	0,50	95,69	Alto
	0,44	103,71	Baixo
	0,38	110,95	Baixo
	0,34	117,57	Baixo
15% CLETA 7,50% calcário	0,66	99,18	Alto
	0,56	126,06	Baixo
	0,48	152,91	Baixo
	0,41	179,73	Baixo
	0,35	206,52	Desprezível

Para os traços de referência, risco de corrosão baixo foi obtido para relações a/agl menores que 0,44. Já para os traços com 15% de CLETA e 7,5% de calcário,

risco de corrosão baixo foi obtido com relação  $a/agl$  0,56, que é elevada. Embora elevadas resistividades elétricas (e, conseqüentemente, menor risco de corrosão pelas classificações das bibliografias) possam ser alcançadas com elevadas relações  $a/agl$ , este comportamento pode estar relacionado a redução da condutividade elétrica da solução dos poros, e não necessariamente a alterações microestruturais (ou seja, maior compacidade). Isto porque traços com elevadas relações  $a/agl$  tendem a ter maior penetrabilidade, estando mais suscetíveis a ataques de agentes agressivos e, conseqüentemente, à deterioração da estrutura.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar a influência da substituição parcial do cimento Portland por cinza de lodo de ETA (CLETA) e calcário moído sobre propriedades relacionadas à durabilidade do concreto, em especial sua resistividade elétrica aparente.

Assim como esperado, a resistividade elétrica dos concretos aumentou com o tempo. A partir da verificação e validação de um modelo matemático gerado pelo planejamento experimental estatístico do tipo Planejamento Rotativo Composto Central (PRCC), e análise por meio da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), pode-se verificar a influência e o efeito das variáveis da pesquisa sobre a resistividade elétrica em cada idade de ensaio.

Nesta avaliação, a CLETA apresentou efeito estimado negativo sobre a resistividade elétrica nas idades iniciais e positivo a partir dos 28 dias. Além disso, o teor máximo de CLETA indicado pelos contornos das superfícies de resposta variou do teor mínimo (0%) aos 7 dias ao teor máximo (30%) aos 91 dias, especialmente para as menores relações água/aglomerante.

Este comportamento indicou alta atividade pozolânica da CLETA, sendo mais notável nas misturas ternárias com o calcário, especialmente naquelas com elevados teores de substituição em que a CLETA e o calcário apareciam na proporção 2:1. Verificou-se então um efeito sinérgico entre estas duas adições minerais, já observado em outros estudos com argila calcinada e metacaulim, que indicam que o calcário funcionou como ponto de nucleação para formação dos produtos de hidratação.

Este efeito de nucleação do calcário para formação do C-S-H pode ser observado desde as idades iniciais. O teor máximo de substituição de cimento por calcário foi em torno de 7,5% (teor médio) até os 28 dias, aumentando um pouco a partir desta idade. Isso indica que o calcário foi importante para a resistividade elétrica desde as idades iniciais.

Já o efeito negativo do aumento da relação água/aglomerante foi maior a cada idade de ensaio e está relacionado principalmente à porosidade do concreto. Menores relações a/agl resultam em menor porosidade capilar e, conseqüentemente, em maiores resistividades elétricas em idades mais avançadas.

Tanto a condutividade elétrica quanto o pH também apresentaram redução com o tempo. Por meio da comparação feita entre estas propriedades e a resistividade

elétrica pode-se observar que ambas aumentaram quando a relação a/agl reduziu. Este comportamento, aparentemente contraditório, já havia sido observado por outros autores e indica que em baixas relações a/agl a concentração de íons é maior, mas a resistividade elétrica é elevada pelas alterações na microestrutura do concreto, devido a formação de mais produtos de hidratação e seccionamento dos poros capilares (razão pela qual o efeito da resistividade elétrica se sobrepõe ao efeito da condutividade).

Quanto à avaliação do risco de corrosão, os traços do planejamento experimental que alcançaram risco de corrosão desprezível aos 91 dias foram os Traços 3 e 13, com baixas relações a/agl e elevados teores de substituição de cimento Portland por CLETA e calcário (Traço 13: 15% de CLETA, 7,5% de calcário e relação a/agl 0,35 e Traço 3: 23,9% de CLETA, 12% de calcário e relação a/agl 0,41). Além disso, os traços que alcançaram o menor risco de corrosão nesta idade, em cada relação a/agl, foram aqueles que continham elevados teores de CLETA e calcário na proporção 2:1. Este comportamento está de acordo com o mencionado por outros autores, que relataram melhores resultados quanto a outras propriedades investigadas, principalmente as mecânicas, para esta mesma proporção de material argiloso e calcário.

Em relação aos traços definidos pelas equações do modelo matemático para as idades de 28 e 91 dias e pelas relações a/agl máximas para cada classe de agressividade ambiental definida pela NBR 12655 (ABNT, 2015), melhores resultados de resistividade elétrica e baixo risco de corrosão foram observados para teores entre 15% e 20% de CLETA e 7,5% e 10% de calcário para todas as classes de agressividade ambiental. Para a classe de agressividade IV (relação a/agl 0,45), altos valores de resistividade elétrica foram obtidos com teores acima de 20% de CLETA e de 10% de calcário, embora o “risco de corrosão desprezível” não tenha sido alcançado em nenhum dos casos.

Levando em consideração determinados valores de resistência mecânica, traços com 15% de CLETA e 7,5% de calcário em substituição do cimento Portland resultaram em aumento de resistividade elétrica (de 21% a 38%), diminuição do risco de corrosão e economia de cimento (superior a 100 kg/m<sup>3</sup>) em relação ao seu traço de referência de mesma resistência à compressão.

A partir disso conclui-se que a substituição de cimento Portland por CLETA e calcário é benéfica para as propriedades do concreto relacionadas à durabilidade,

principalmente sobre a resistividade elétrica aparente. Embora altas resistividades elétricas foram observadas para teores de substituição de CLETA próximo aos 30% e baixas relações a/agl (o que pode aumentar muito o custo devido ao uso de aditivos), substituições com teores de 15% de CLETA e 7,5% de calcário mostraram-se satisfatórios para alcançar risco baixo de corrosão, inclusive para altas classes de agressividade ambiental.

#### Sugestões para trabalhos futuros

Por meio desta pesquisa observou-se que é viável tecnicamente o uso de cinza de lodo de ETA e calcário moído para melhoria de propriedades relacionadas à durabilidade do concreto, principalmente a resistividade elétrica.

Sugere-se, no entanto, a realização de outros ensaios para melhor entendimento dos fatores que tiveram influência sobre estas propriedades, como os que seguem:

- Ensaio de difração de raios-x afim de verificar que compostos estão sendo formados em cada idade;
- Ensaio de porosimetria de intrusão de mercúrio para análise da distribuição de tamanho de poros.
- Determinação do teor de hidróxido de cálcio remanescente para avaliar o consumo da portlandita pela CLETA.

Além disso, sugere-se o estudo de outras propriedades que podem exercer influência sobre a corrosão das armaduras embutidas no concreto, como penetrabilidade de cloretos, permeabilidade de oxigênio, teor de cloretos fixados e regime de cura.

## REFERÊNCIAS

ABREU, A. G. DE. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. 1998. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

ADORNA, D. DA L. **Carbonatação acelerada em concretos com adição de cinzas de lodo de estação de tratamento de água**. 2016. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

AL-RAWAS, A. A. et al. Properties of Omani artificial pozzolana (sarooj). **Applied Clay Science**, v. 13, p. 275–292, 1998.

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types. **Cement and Concrete Research**, v. 18, n. 5, p. 687–698, 1988.

ALUJAS, A. et al. Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. **Applied Clay Science**, v. 108, p. 94–101, 2015.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **Standard test method for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. AASHTO Designation: TP95-11**, AASHTO Provisional Standards, Washington (DC), 2010.

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

ANDRÉS, L. M. V. et al. Effect of fineness in clinker-calcined clays-limestone cements. **Advances in Cement Research**, v. 27, n. 9, p. 546–556, 2015.

ANTOLINI, M. B. **Retração total e penetração de cloretos em concretos compostos com cinza de lodo de ETA e outras adições minerais**. 2015. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

ANTONI, M. et al. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 1579–1589, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 11579: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. Rio de Janeiro, 2012.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 15894-1: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1 - Requisitos..** Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15894-3: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm.** Rio de Janeiro, 2010.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 5733 - Cimento Portland de alta resistência inicial.** Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, 2014.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 7117: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 7809 - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 10: Cimento Portland - Análise química - Disposições gerais.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 11-1: Cimento Portland - Análise química - Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria Parte 1: Método ISO.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 12: Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 13: Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol.** Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 14: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio.** R, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 15: Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 16: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 17: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 18: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 19: Cimento Portland - Análise química - Determinação de enxofre na forma de sulfeto.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 21: Cimento Portland - Análise química - Método optativo para a determinação de dióxido de silício, óxido de alumínio, óxido férrico, óxido de cálcio e óxido de magnésio.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 26 - Agregados - Amostragem.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 43 - Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 65 - Cimento Portland - Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

BARNEYBACK, R. S. J.; DIAMOND, S. Expression and analysis of pore fluids from hardened cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 11, p. 279–285, 1981.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobertura. In: **OLIVIER, J.P; VICHOT, A. DURABILIDADE DO CONCRETO: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente.** Tradução: Oswaldo Cascudo e Helena Carasek – Universidade Federal de Goiás: IBRACON, 2014. p. 255–326.

BATALHA, C. T.; ROCHA, F. DOS S. **Caracterização do lodo calcinado das estações de tratamento de água da cidade de Manaus.** In: Congresso Brasileiro do Concreto, 55., 2013, Gramado, Anais... 1 CD-ROM, 2013.

BATALHA, C. T.; ROCHA, F. DOS S. **Avaliação das propriedades das argamassas com substituição parcial de cimento por cinza de lodo da estação de tratamento de água da cidade de Manaus.** In: Congresso Brasileiro do Concreto, 56., 2014, Natal, Anais... 1 CD-ROM, 2014.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.** 1. ed. São Paulo: Pini; Goiânia: Editora UFG, 1997.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ação da Carbonatação no Concreto. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia.** Volume I, São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1968.

CEB 192. **Diagnosis and Assessment of Concrete Structures.** State of Art Report of the Comité Euro-International du Béton, n. 192. Luisiana, 1989.

CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. **CO<sub>2</sub> and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry,** 2011. Disponível em: <[www.wbcdcement.org/pdf/tf1\\_co2\\_protocol\\_v3.pdf](http://www.wbcdcement.org/pdf/tf1_co2_protocol_v3.pdf)>

CHEN, C.-T.; CHANG, J.; YEIH, W. The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 35–43, 2014.

CHEN, H.; MA, X.; DAI, H. Reuse of water purification sludge as raw material in cement production. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 6, p. 436–439, 2010.

CORDEIRO, J. S. Importância so Tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de ETAs. In: **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. . Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CRUZ, J. M. et al. The use of electrical impedance spectroscopy for monitoring the hydration products of Portland cement mortars with high percentage of pozzolans. **Cement and Concrete Research**, v. 50, p. 51–61, 2013.

DEBOUCHA, W. et al. Effect of incorporating blast furnace slag and natural pozzolana on compressive strength and capillary water absorption of concrete. **Procedia Engineering**, v. 108, p. 254–261, 2015.

EL-DIDAMONY, H.; KHALIL, K. A.; HEIKAL, M. Physico-chemical and surface characteristics of some granulated slag–fired drinking water sludge composite cement pastes. **HBRC Journal**, v. 10, p. 73–81, 2014.

FIGUEIREDO, E. J. P.; MEIRA, G. R. Corrosão das Armaduras das Estruturas de Concreto. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Volume I, São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1968.

FIGUEIREDO, E. P. Ação dos Cloretos no Concreto. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Volume I, São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1968.

FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (FDOT). **Florida method of test for concrete resistivity as an electrical indicator of its permeability. FM 5-578**, 2004.

FURQUIM, P. R. D. V. **Estudo estatístico de produção de concretos com adições minerais**. 2006. 208 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

GAO, K.; ZHOU, S.; ZHAO, X. CO<sub>2</sub> Emissions due to Cement Manufacture. **Materials Science Forum**, v. 687, p. 181–187, 2011.

GARTNER, E. Industrially interesting approaches to “low-CO<sub>2</sub>” cements. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1489–1498, 2004.

GASTALDINI, A. L. G. et al. Influence of the use of rice husk ash on the electrical resistivity of concrete: A technical and economic feasibility study. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 3411–3419, 2009.

GASTALDINI, A. L. G. et al. Total shrinkage, chloride penetration, and compressive strength of concretes that contain clear-colored rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 369–377, 2014.

GASTALDINI, A. L. G. et al. The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 513–520, 2015.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

HAJJAJI, M.; MLEZA, Y. Hydrated burnt clay-lime mixes: Effects of curing time and lime addition. **Applied Clay Science**, v. 101, p. 177–183, 2014.

HEGAZY, B. E.-D. E.; FOUAD, H. A.; HASSANAIN, A. M. Incorporation of water sludge, silica fume, and rice husk ash in brick making. **Advances in environmental research**, v. 1, p. 83–96, 2012.

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

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

HENGEN, M. F. **Caracterização de cinza de lodo de ETA para uso no concreto - (Resistência a compressão axial)**. 2014. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

HOPPE, T. F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. 2005. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

HOPPEN, C. et al. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Cerâmica**, v. 51, p. 85–95, 2005.

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

HOSSAIN, M. M. et al. Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review. **Construction and Building Materials**, v. 116, p. 128–140, 2016.

HOU, T. C. et al. Effects of coarse aggregates on the electrical resistivity of Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 397–408, 2017.

ISAIA, G. C. A. **Efeitos das misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. 1995, 280f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. **Ambiente Construído**, v. 4, p. 19–30, 2004.

KIRCHHEIM, A. P.; RHEINHEIMER, V.; DAL MOLIN, D. C. C. Comparative study of white and ordinary concretes with respect of carbonation and water absorption. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 320–330, 2015.

LAYSSI, H. et al. Electrical Resistivity of Concrete - Concepts, applications, and measurement techniques. **Concrete International**, p. 41–46, 2015.

LI, Q.; XU, S.; ZENG, Q. The effect of water saturation degree on the electrical properties of cement-based porous material. **Cement and Concrete Composites**, v. 70, p. 35–47, 2016.

LIU, Z. et al. An analytical model for determining the relative electrical resistivity of cement paste and C-S-H gel. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 647–655, 2013.

LONGUET, P.; BURGLIN, L.; ZELWER, A. The liquid phase of hydrated cement. **Mater. Constr.**, v. 676, p. 35–41, 1973.

LOPEZ, R. F. **Calcined Clayey Soils as a Potential Replacement for Cement in Developing Countries**. 2009, 187f. Tese (Doutorado em Engenharia de Ciências e Materiais) - Instituto Federal Suíço de Tecnologia em Lausanne, Suíça, 2009.

LÜBECK, A. **Resistividade elétrica de concretos de cimento Portland branco e elevados teores de escória de alto forno**. 2008. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

MA, H. et al. Estimate the relative electrical conductivity of C-S-H gel from experimental results. **Computers and Chemical Engineering**, v. 71, p. 94–103, 2014.

MARQUES, P. F.; CHASTRE, C.; NUNES, Â. Carbonation service life modelling of RC structures for concrete with Portland and blended cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, n. 1, p. 171–184, 2013.

MARTIRENA, J. et al. Production of activated clays for low cost building materials in developing countries. **13th International Congress on the Chemistry of Cement. Cementing and sustainable future**, p. 1–7, 2011.

MCCARTER, W. J.; STARRS, G.; CHRISP, T. M. Electrical conductivity, diffusion, and permeability of Portland cement-based mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1395–1400, 2000.

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

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. DE O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Volume I, São

Paulo: IBRACON, 2011. p. 1968.

MEDEIROS FILHO, S. DE. **Fundamentos de medidas elétricas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A., 1981.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: Pini, 2008.

MISSAU, F. **Penetração de cloretos em concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. 2004. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 3. ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

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

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

ØSTVIK JR, J.-M. **Thermal Aspects of Corrosion of steel in concrete**, 2004. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:123236/FULLTEXT01.pdf>>

POLDER, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation. **Construction and Building Materials**, v. 15, n. 2–3, p. 125–131, mar. 2001.

PRESUEL-MORENO, F.; WU, Y. -Y.; LIU, Y. Effect of curing regime on concrete resistivity and aging factor over time. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 874–882, 2013.

PRINCIGALLO, A.; BREUGEL, K. VAN; LEVITA, G. Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1755–1763, 2003.

RAMEZANIANPOUR, A. A. et al. Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2472–2479, 2011.

RAMIREZ, K. G. et al. **Influência da adição de lodo de ETA in natura e calcinado na produção de concreto**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 57., 2015, Bonito, Anais... 1 CD-ROM, 2015.

RIBEIRO, D. V. Estrutura dos poros e mecanismos de transporte no concreto. In:

**Corrosão Em Estruturas de Concreto Armado - Teoria, Controle e Métodos de Análise.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. p. 75–85.

RIBEIRO, D. V.; CUNHA, M. P. T. Técnicas de avaliação e monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado. In: **Corrosão Em Estruturas de Concreto Armado - Teoria, Controle e Métodos de Análise.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014a. p. 171–221.

RIBEIRO, D. V.; CUNHA, M. P. T. Deterioração das estruturas de concreto armado. In: **Corrosão Em Estruturas de Concreto Armado - Teoria, Controle e Métodos de Análise.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014b. p. 87–118.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água.** São Paulo: Blucher, 2001.

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento.** São Paulo: Blucher, 2009.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Experimental Design and Process Optimization.** New York: CRC Press, 2015.

ROSA, D. W. DA. **Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de escória de alto forno e ativador químico.** 2005. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SABIR, B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, p. 441–454, 2001.

SALEM, T. M. Electrical conductivity and rheological properties of ordinary Portland cement – silica fume and calcium hydroxide – silica fume pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1473–1481, 2002.

SAMET, B.; MNIF, T.; CHAABOUNI, M. Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: Formulation of blended cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, p. 741–749, 2007.

SANTOS, M. N. et al. **Avaliação da Resistência Mecânica de Argamassas com Cimento Portland e Lodo de Estação de Tratamento de Água.** In: Congresso Brasileiro do Concreto, 56., 2014, Natal, Anais... 1 CD-ROM, 2014.

SENGUL, O. Use of electrical resistivity as an indicator for durability. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 434–441, 2014.

SHI, C.; STEGEMANN, J. A.; CALDWELL, R. J. Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and its implications on the rapid chloride permeability test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results. **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 4, p. 389–394, 1998.

SINC. **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento** Disponível em <<http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1510167640.pdf>>, 2016.

SINGH, M.; GARG, M. Reactive pozzolana from Indian clays-their use in cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1903–1907, 2006.

SONG, G. Equivalent circuit model for AC electrochemical impedance spectroscopy of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1723–1730, 2000.

STEENBERG, M. et al. Composite cement based on Portland cement clinker, limestone and calcined clay. **XIII Int. Congr. Chem. Cem.** **97.**, p. 1–7, 2011.

STEIN, R. T. **Características de pastas de cimento Portland com adição de cinza de lodo de ETA**. 2016. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

STERN, M.; GEARY, A. L. Electrochemical Polarization. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 104, p. 56–63, 1957.

TASHIRO, C.; IKEDA, K.; INOUE, Y. Evaluation of pozzolanic activity by the electric resistance measurement method. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 1133–1139, 1994.

TIRONI, A. et al. Kaolinitic calcined clays: Factors affecting its performance as pozzolans. **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 276–281, 2012a.

TIRONI, A. et al. Incorporation of calcined clays in mortars: porous structure and compressive strength. **Procedia Materials Science**, v. 1, p. 366–373, 2012b.

TIRONI, A. et al. Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 319–327, 2013.

TIRONI, A. et al. Kaolinitic calcined clays – Portland cement system: Hydration and properties. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 215–221, 2014.

TOPÇU, I. B.; UYGUNOGLU, T.; HOCAOGLU, I. Electrical conductivity of setting cement paste with different mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 414–420, 2012.

TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. **Swedish Cement and Concrete Research Institute**, p. 6–15, 1982.

VAN NOORT, R.; HUNGER, M.; SPIESZ, P. Long-term chloride migration coefficient in slag cement-based concrete and resistivity as an alternative test method. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 746–759, 2016.

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

XI, Y.; SIEMER, D. D.; SCHEETZ, B. E. Strength development, hydration reaction and pore structure of autoclaved slag cement with added silica fume. **Cement and concrete research**, v. 27, n. 1, p. 75–82, 1997.

XU, Q.; JU, Y.; GE, H. Modeling of Carbon Dioxide Measurement on Cement Plants. **Advanced Materials Research**, v. 610–613, p. 2120–2128, 2013.

ZACCARDI, Y. A. V.; DI MAIO, Á. A. Electrical resistivity measurement of unsaturated concrete samples. **Magazine of Concrete Research**, v. 66, p. 484–491, 2014.

ZUO, Y.; WEI, X. Relations among electrical resistivity , chemical and autogenous shrinkage of cement pastes. **Advances in Cement Research**, v. 27, n. 3, p. 175–183, 2015.

## APÊNDICE A

Tabela 30 - Resistência mecânica dos traços do planejamento experimental.

Traço	Variáveis			Resistência Mecânica (MPa)		
	CLETA (%)	Calcário (%)	Relação a/agl	7 dias	28 dias	91 dias
REF 0,35	0,0	0,0	0,35	64,31	78,37	82,41
REF 0,50	0,0	0,0	0,50	32,97	41,06	46,49
REF 0,65	0,0	0,0	0,65	24,58	30,99	33,37
1	6,1	3,0	0,41	49,21	58,11	60,40
2	23,9	3,0	0,41	40,49	66,87	68,46
3	23,9	12,0	0,41	20,83	57,36	59,98
4	6,1	12,0	0,41	40,40	50,19	54,96
5	6,1	3,0	0,59	24,82	34,48	39,32
6	23,9	3,0	0,59	25,64	39,22	43,68
7	23,9	12,0	0,59	24,67	36,76	40,22
8	6,1	12,0	0,59	28,78	36,19	40,32
9	0,0	7,5	0,50	30,35	39,89	41,43
10	30,0	7,5	0,50	1,02	24,28	27,94
11	15,0	0,0	0,50	44,82	57,86	62,10
12	15,0	15,0	0,50	38,16	51,65	55,99
13	15,0	7,5	0,35	67,91	75,11	83,85
14	15,0	7,5	0,65	28,36	36,20	37,82
15	15,0	7,5	0,50	42,40	56,79	58,22
16	15,0	7,5	0,50	43,45	56,75	60,54
17	15,0	7,5	0,50	43,80	56,29	58,17