

Caroline Venâncio

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS DE  
MATRIZES CIMENTÍCIAS CONTENDO METAIS PESADOS.**

Dissertação submetida ao  
Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Civil da Universidade  
Federal de Santa Catarina, para obtenção  
do grau de mestre em Engenharia Civil.  
Orientador: Prof<sup>a</sup> Dr. Janaíde C. Rocha.  
Co - Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr. Malik Cheriaf.

**Florianópolis  
2012**



Caroline Venâncio

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS DE  
MATRIZES CIMENTÍCIAS CONTENDO METAIS PESADOS.**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, outubro de 2012.

---

Prof. Dr. Roberto Caldas de Andrade Pinto  
Coordenador do Curso de PPGEC

**Banca Examinadora:**

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Janaíde Cavalcante Rocha  
Orientadora- PPGEC - UFSC

---

Prof. Dr. Malik Cheriaf  
Co-Orientador – PPGEC - UFSC

---

Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves  
Examinador Externo - UFCG

---

Prof. Dr. Jefferson L. B. Marques  
EEL - UFSC

---

Prof. Dr Roberto Caldas de Andrade Pinto  
PPGEC - UFSC

---

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.  
PPGEC - UFSC



Este trabalho é dedicado à minha mãe  
Erotildes, ao meu pai Sérgio, ao meu  
irmão Filipe e ao meu noivo Rodolfo.



## AGRADECIMENTOS

Para a conclusão deste trabalho agradeço a minha orientadora professora Janaíde Cavalcante Rocha que desde o ano de 2007, quando entrei no Laboratório ValoRes, como aluna de Iniciação Científica, não tem medido esforços para me ensinar acerca das pesquisas e a importância deste trabalho para o crescimento tecnológico e científico do Brasil. Ao professor Malik Cheriaf também sou grata pelo apoio prestado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao IEB- Instituto de Pesquisa Biomédica da UFSC pelo empréstimo dos equipamentos e em especial aos professores Jefferson, Daniela e sua equipe. Ao mestrando Rafael, orientando da professora Daniela, também agradeço pelas tardes que realizamos os primeiros ensaios e por suas explicações relacionadas à utilização dos equipamentos.

No ambiente de laboratório ValoRes os amigos sempre foram importantes para a troca de informações, auxílio prestado em alguns ensaios, conversas e momentos de descontração. A estes meu muito obrigado: Júlio, Cecília, Eliz, João, Lidi, Rodolfo, Fabiana e as mais novas bolsistas de iniciação científica Marina e Bianca.

A minha família também agradeço, por suas compreensões, incentivo e reconhecimento. E ao final deste trabalho tenho muito a agradecer por poder mostrar esta pesquisa ao meu avô Abel Manoel Guedes que apresentou alguns problemas de saúde e se recuperou bem.

Aos meus pais, Sérgio e Erotildes, também agradeço por me incentivarem a estudar e continuar com a pós-graduação. Ao meu irmão Filipe e ao meu noivo Rodolfo, pelas trocas de experiências na universidade.

Também sempre foi muito bom tomar os cafés da tarde, durante os finais de semana, na casa da minha avó Élia, na casa da Catarina e encontrar com o meu afilhado Miguel e o Gabriel, os anjos que deus colocou na minha vida que me fazem rir e reconhecer que o que vale realmente a pena são os pequenos afazeres e prazeres da vida.

Agradeço também ao CNPq pelo importante financiamento da pesquisa e concessão da bolsa de mestrado.

Enfim, Obrigada!



“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão  
uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe  
faltasse uma gota.”

(Madre Teresa de Calcutá.).



## RESUMO

Os materiais de construção são avaliados quanto ao seu comportamento mecânico, durabilidade e mais recentemente, em relação ao risco de contaminação ambiental que estes podem apresentar ao homem e ao meio ambiente. Alguns metais pesados podem ser encontrados em resíduos incorporados nas matrizes cimentícias. Estas técnicas de introdução dos resíduos em matrizes cimentícias permitem a estabilização/solidificação dos contaminantes. No entanto, esta imobilização deve ser monitorada e comprovada a sua eficiência nos aspectos envolvendo a retenção dos poluentes. Neste sentido, esta pesquisa teve por objetivo utilizar as medidas elétricas para avaliar os metais pesados no processo de hidratação das argamassas ao longo do tempo, avaliar as alterações estruturais que os metais pesados provocaram nas argamassas e relacionar as medidas elétricas com os ensaios de lixiviação. Os metais pesados Cr, Cd, Pb e Zn foram adicionados às argamassas nas concentrações de 20, 40, 80 e 160 ppm em relação a massa de cimento. Estas argamassas foram submetidas aos ensaios de lixiviação e à análise por espectroscopia por impedância elétrica (EIE). No ensaio elétrico foi aplicada uma corrente alternada, variando a frequência de 200 kHz até 2MHz. O comportamento da lixiviação dos metais foi obtido através da realização dos ensaios de tanque (*Tank Test*), de lixiviação e de solubilização, descritos pelas normas brasileiras NBR 10005 e NBR 10006. Os resultados mostraram que as medidas elétricas podem ser usadas como método para monitorar os contaminantes em argamassas. O metal zinco apresentou uma maior variação nos valores das medidas de impedância elétrica obtidas entre as amostras contaminadas nas diferentes concentrações. Enfim, as medidas elétricas podem caracterizar os parâmetros que influenciam na liberação dos metais pesados.

**Palavras Chave:** impedância elétrica, metais pesados, argamassas.



## ABSTRACT

Construction materials are evaluated by the mechanical behavior, durability and most recently in relation to the risk of environmental contamination. Some heavy metals can be found in residues incorporated into cementitious matrices. These techniques for introduction of the waste into cementitious matrices allow the stabilization / solidification of contaminants. However, this immobilization should be monitored. Therefore, this research aims to utilize the electrical measurements to evaluate the influence of heavy metals in the hydration process in the mortar over time, assess structural changes caused by heavy metals in the mortar and correlate the electrical tests with the leaching tests. The heavy metals Cr, Cd, Pb and Zn were added to the mortar at concentrations of 20, 40, 80 and 160 ppm with respect to the cement mass. These mortars were subjected to leaching tests and analysis by electrical impedance spectroscopy (EIS). In this electrical test was applied electric alternating current by varying the frequency of 200 kHz to 2 MHz. The leaching behavior of the metals was obtained by testing tank (Tank Test), the leaching test described by the Brazilian standard NBR 10005 and solubilization testing (NBR 10006). The results showed that electrical measurements may be used as a method for monitoring contaminants in mortars. The metal zinc showed more variation in the electrical impedance between the contaminated samples in the different concentrations. The values of electrical resistivity along the hydration process allowed an approximation of the tortuosity of mortars. Anyway, can characterize the physical parameters that influence the release of heavy metals by electrical tests.

**KEYWORDS:** impedance electrical, heavy metals, mortar.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Calor de hidratação de pastas de cimento contaminadas com cromo, níquel e zinco. ....	35
Figura 2 - Formas de liberação dos contaminantes no ensaio de tanque. ....	39
Figura 3 – Espectro de Impedância esquemático para uma corrente alternada. ....	42
Figura 4 - Avaliação da simetria nos espectros de impedância. ....	43
Figura 5 - Circuito Elétrico Equivalente .....	44
Figura 6 – Esquema do circuito de uma unidade elementar, numa pasta de cimento. ....	45
Figura 7 - Circuitos equivalentes e os espectros de impedância. ....	46
Figura 8 – Circuito elétrico equivalente para uma unidade elementar de pasta de cimento. ....	47
Figura 9 – Camadas do corpo de prova de acordo com a aplicação do campo elétrico. ....	48
Figura 10 – Espectro de impedância de pastas de cimento com diferentes espessuras. ....	49
Figura 11 - Espectro de impedância das pastas de cimento. ....	50
Figura 12 – Circuito equivalente do ensaio de impedância elétrica. ....	51
Figura 13 – Condutividade elétrica das rochas contaminadas. ....	53
Figura 14 – Relações entre as resistividades elétricas, fator a/c, natureza do agregado e teor de aditivo. ....	55
Figura 15 – Constante dielétrica de pastas de cimento com diferentes relações a/c. ....	56
Figura 16 – Ensaio de Espectroscopia de Impedância Elétrica (EIE) ...	58
Figura 17 – Sólido poroso e cúbico, apresentando tortuosidade igual a um. ....	59
Figura 18 – Simulação do sistema de poros em 3D. ....	59
Figura 19 - Relação Linear do produto entre a resistividade elétrica e a difusividade. ....	63
Figura 20 – Fluxograma das etapas metodológicas. ....	68
Figura 21 - Seccionamento das argamassas. ....	71
Figura 22 – Gerador de tensão para corrente alternada, osciloscópio e a argamassa. ....	73
Figura 23 - Circuito elétrico utilizado para a medição da impedância elétrica. ....	74
Figura 24 - Amostras monolíticas dentro dos tanques. ....	76
Figura 25 – Argamassas submetidas ao ensaio de absorção capilar. ....	79

Figura 26 – Índice de vazios das argamassas.....	82
Figura 27 - Impedância elétrica da argamassa de referência (a/c igual a 0,40) em função do tempo de cura.....	84
Figura 28 - Impedância elétrica da argamassa de referência (a/c igual a 0,50) em função do tempo de cura.....	84
Figura 29 - Impedância elétrica da argamassa de referência (a/c igual a 0,60) em função do tempo de cura.....	85
Figura 30 – Espectro de impedância das argamassas de referência aos três dias de cura.....	86
Figura 31 -- Espectro de impedância das argamassas de referência aos sete dias de cura.....	86
Figura 32 - Espectro de impedância das argamassas de referência aos 14 dias de cura.....	87
Figura 33 - Espectro de impedância das argamassas de referência aos 28 dias de cura.....	87
Figura 34 – Permissividade elétrica das argamassas de referência aos sete dias de cura.....	88
Figura 35 – Permissividade elétrica das argamassas de referência aos sete dias de cura.....	88
Figura 36 – Permissividade elétrica das argamassas de referência aos 14 dias de cura.....	89
Figura 37 – Permissividade elétrica das argamassas de referência aos 28 dias de cura.....	89
Figura 38 – Resistência elétrica total das argamassas de referência.....	90
Figura 39 - Impedância elétrica da argamassa Cd 20 em função do tempo de cura.....	90
Figura 40 - Impedância elétrica da argamassa Cd 40 em função do tempo de cura.....	91
Figura 41 - Impedância elétrica da argamassa Cd 80 em função do tempo de cura.....	91
Figura 42 – Impedância elétrica da argamassa Cd 160 em função do tempo de cura.....	92
Figura 43 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cádmio aos três dias de cura.....	92
Figura 44 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cádmio aos sete dias de cura.....	93
Figura 45 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cádmio aos 14 dias de cura.....	93
Figura 46 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cádmio aos 28 dias de cura.....	93



Figura 47 – Espectro de impedância das argamassas de referência aos três dias de cura.....	94
Figura 48 - Espectro de impedância das argamassas de referência aos sete dias de cura. ....	94
Figura 49 - Espectro de impedância das argamassas de referência aos 14 dias de cura.....	95
Figura 50 - Espectro de impedância das argamassas de referência aos 28 dias de cura.....	95
Figura 51 – Resistência elétrica total das argamassas contaminadas com cádmio. ....	96
Figura 52 - Impedância elétrica da argamassa Cr 20 em função do tempo de cura. ....	97
Figura 53 - Impedância elétrica da argamassa Cr 40 em função do tempo de cura. ....	97
Figura 54 Impedância elétrica da argamassa Cr 80 em função do tempo de cura. ....	98
Figura 55 - Impedância elétrica da argamassa Cr 160 em função do tempo de cura. ....	98
Figura 56 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cromo aos três dias de cura. ....	99
Figura 57 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cromo aos sete dias de cura. ....	99
Figura 58 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cromo aos 14 dias de cura. ....	100
Figura 59 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cromo aos 28 dias de cura. ....	100
Figura 60 - Espectro de impedância das argamassas contaminadas com cromo aos três dias de cura. ....	101
Figura 61 - Espectro de impedância das argamassas contaminadas com cromo aos sete dias de cura. ....	101
Figura 62 - Espectro de impedância das argamassas contaminadas com cromo aos 14 dias de cura. ....	102
Figura 63 - Espectro de impedância das argamassas contaminadas com cromo aos 28 dias de cura. ....	102
Figura 64 – Resistência elétrica total das argamassas contaminadas com cromo.....	103
Figura 65 - Impedância elétrica da argamassa Pb 20 em função do tempo.....	103
Figura 66 - Impedância elétrica da argamassa Pb 40 em função do tempo de cura. ....	104

Figura 67 - Impedância elétrica da argamassa Pb 80 em função do tempo de cura.....	104
Figura 68 - Impedância elétrica da argamassa Pb 160 em função do tempo de cura.....	104
Figura 69 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com chumbo aos três dias de cura.....	105
Figura 70 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com chumbo aos sete dias de cura.....	105
Figura 71 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com chumbo aos 14 dias de cura.....	106
Figura 72 - Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com chumbo aos 28 dias de cura.....	106
Figura 73 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com chumbo aos três dias de cura.....	107
Figura 74 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com chumbo aos sete dias de cura.....	108
Figura 75 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com chumbo aos 14 dias de cura.....	108
Figura 76 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com chumbo aos 28 dias de cura.....	109
Figura 77 – Resistência elétrica total das argamassas contaminadas com chumbo.....	109
Figura 78 – Impedância elétrica da argamassa Zn 20 em função do tempo de cura.....	110
Figura 79 - Impedância elétrica da argamassa Zn 40 em função do tempo de cura.....	110
Figura 80 - Impedância elétrica da argamassa Zn 80 em função do tempo de cura.....	111
Figura 81 - Impedância elétrica da argamassa Zn 160 em função do tempo de cura.....	111
Figura 82 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com zinco aos três dias de cura.....	112
Figura 83 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com zinco aos sete dias de cura.....	112
Figura 84 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com zinco aos 14 dias de cura.....	113
Figura 85 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com zinco aos 28 dias de cura.....	113
Figura 86 – Espectros de impedância das argamassas contaminadas com zinco aos três dias de cura.....	114

Figura 87 – Espectros de impedância das argamassas contaminadas com zinco aos sete dias de cura.....	114
Figura 88 – Espectros de impedância das argamassas contaminadas com zinco aos 14 dias de cura.....	115
Figura 89 - – Espectros de impedância das argamassas contaminadas com zinco aos 28 dias de cura.....	115
Figura 90 – Resistência elétrica total das argamassas contaminadas com zinco.....	116
Figura 91 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa de referência (a/c = 0,40).....	117
Figura 92 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa de referência (a/c = 0,50).....	118
Figura 93 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa de referência (a/c = 0,60).....	118
Figura 94 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 20 ppm de cádmio.....	119
Figura 95 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 40 ppm de cádmio.....	119
Figura 96 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 80 ppm de cádmio.....	119
Figura 97 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 160 ppm de cádmio.....	120
Figura 98 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 20 ppm de cromo.....	120
Figura 99- Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 40 ppm de cromo.....	121
Figura 100- Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 80 ppm de cromo.....	121
Figura 101 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 160 ppm de cromo.....	121
Figura 102 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 20 ppm de chumbo.....	122
Figura 103- Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 40 ppm de chumbo.....	122
Figura 104- Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 80 ppm de chumbo.....	123
Figura 105 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 160 ppm de chumbo.....	123
Figura 106 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 20 ppm de zinco.....	124

Figura 107 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 40 ppm de zinco.....	124
Figura 108 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 80 ppm de zinco.....	124
Figura 109 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 160 ppm de zinco.....	125
Figura 110 – Concentração de cálcio liberada das argamassas durante ensaio de lixiviação (NBR 10005).....	125
Figura 111 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra de referência de relação a/c igual a 0,40.....	127
Figura 112 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra de referência de relação a/c igual a 0,40.....	127
Figura 113 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra de referência de relação a/c igual a 0,40.....	128
Figura 114 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 20 ppm de cádmio.....	128
Figura 115 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 40 ppm de cádmio.....	129
Figura 116 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 80 ppm de cádmio.....	129
Figura 117 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 160 ppm de cádmio.....	129
Figura 118 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 20 ppm de cromo.....	130
Figura 119 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 40 ppm de cromo.....	130
Figura 120 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 80 ppm de cromo.....	131
Figura 121 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 160 ppm de cromo.....	131
Figura 122 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 20 ppm de chumbo.....	132
Figura 123 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 40 ppm de chumbo.....	132
Figura 124 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 80 ppm de chumbo.....	132
Figura 125 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 160 ppm de chumbo.....	133
Figura 126 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 20 ppm de zinco.....	133

Figura 127 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 40 ppm de zinco.....	134
Figura 128 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 80 ppm de zinco.....	134
Figura 129 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 160 ppm de zinco.....	134
Figura 130 – Quantidade de cálcio liberada das argamassas submetidas ao ensaio de solubilização.....	135
Figura 131 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque das argamassas de referência.....	138
Figura 132 - Liberação de cálcio nas argamassas de referência.....	138
Figura 133 - Condutividade elétrica das amostras líquidas (argamassas de referência).....	139
Figura 134 - Impedância elétrica da Ref. 0,40 durante o ensaio de tanque.....	140
Figura 135 - Impedância elétrica da Ref. 0,50 durante o ensaio de tanque.....	140
Figura 136 - Impedância elétrica da Ref. 0,60 durante o ensaio de tanque.....	141
Figura 137 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 20 ppm de cádmio.....	143
Figura 138 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 40 ppm de cádmio.....	143
Figura 139 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 80 ppm de cádmio.....	144
Figura 140 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 160 ppm de cádmio.....	144
Figura 141 - Liberação de cálcio nas argamassas contaminadas com cádmio.....	145
Figura 142 - Condutividade elétrica das amostras líquidas (argamassas contaminadas com cádmio).....	145
Figura 143 - Impedância elétrica da argamassa Cd 20 durante o ensaio de tanque.....	146
Figura 144 - Impedância elétrica da argamassa Cd 40 durante o ensaio de tanque.....	146
Figura 145 - Impedância elétrica da argamassa Cd 80 durante o ensaio de tanque.....	147

Figura 146 - Impedância elétrica da argamassa Cd 160 durante o ensaio de tanque. ....	147
Figura 147 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 20 ppm de cromo. ....	149
Figura 148 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 40 ppm de cromo. ....	149
Figura 149 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 80 ppm de cromo. ....	150
Figura 150 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 160 ppm de cromo. ....	150
Figura 151 - Liberação de cálcio das argamassas contaminadas com cromo. ....	151
Figura 152 - Condutividade elétrica das amostras líquidas (argamassas contaminadas com cromo). ....	151
Figura 153- Impedância elétrica da argamassa Cr 20 durante o ensaio de tanque. ....	152
Figura 154 - Impedância elétrica da argamassa Cr 40 durante o ensaio de tanque. ....	152
Figura 155 - Impedância elétrica da argamassa Cr 80 durante o ensaio de tanque. ....	153
Figura 156 - Impedância elétrica da argamassa Cr 160 durante o ensaio de tanque. ....	153
Figura 157 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque das argamassas contaminadas com chumbo. ....	155
Figura 158 - Liberação de cálcio nas argamassas contaminadas com chumbo. ....	156
Figura 159 - Condutividade elétrica das amostras líquidas (argamassas contaminadas com chumbo). ....	156
Figura 160 - Impedância elétrica da argamassa Pb 20 durante o ensaio de tanque. ....	157
Figura 161 - Impedância elétrica da argamassa Pb 40 durante o ensaio de tanque. ....	157
Figura 162 - Impedância elétrica da argamassa Pb 80 durante o ensaio de tanque. ....	158
Figura 163 - Impedância elétrica da argamassa Pb 160 durante o ensaio de tanque. ....	158

Figura 164 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque das argamassas contaminadas com zinco. ...	160
Figura 165 - Liberações do cálcio das argamassas contaminadas com zinco. ....	161
Figura 166- Condutividade elétrica das amostras líquidas (argamassas contaminadas com zinco). ....	161
Figura 167 – Impedância elétrica da argamassa Zn 20 durante o ensaio de tanque. ....	162
Figura 168 – Impedância elétrica da argamassa Zn 40 durante o ensaio de tanque. ....	162
Figura 169 – Impedância elétrica da argamassa Zn 80 durante o ensaio de tanque. ....	163
Figura 170– Impedância elétrica da argamassa Zn 20 durante o ensaio de tanque. ....	163
Figura 171 - Volume de água absorvido nas argamassas de referência durante o ensaio de absorção capilar. ....	164
Figura 172- Volume de água absorvido nas argamassas contaminadas com cádmio, durante o ensaio de absorção capilar. ....	165
Figura 173- Volume de água absorvido nas argamassas contaminadas com cromo, durante o ensaio de absorção capilar. ....	165
Figura 174- Volume de água absorvido nas argamassas contaminadas com chumbo, durante o ensaio de absorção capilar. ....	165
Figura 175 - Volume de água absorvido nas argamassas contaminadas com zinco, durante o ensaio de absorção capilar. ....	166
Figura 176 – Impedância das argamassas de referência oito dias após o ensaio de absorção. ....	168
Figura 177 – Impedância das argamassas contaminadas com cádmio oito dias após o ensaio de absorção. ....	168
Figura 178 – Impedância das argamassas contaminadas com cromo oito dias após o ensaio de absorção. ....	168
Figura 179 – Impedância das argamassas contaminadas com chumbo oito dias após o ensaio de absorção. ....	169
Figura 180 – Impedância das argamassas contaminadas com zinco oito dias após o ensaio de absorção. ....	169
Figura 181 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com cádmio oito dias após o ensaio de absorção capilar. ....	170
Figura 182 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com cromo oito dias após o ensaio de absorção capilar. ....	171
Figura 183 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com chumbo oito dias após o ensaio de absorção capilar. ....	171

Figura 184 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com zinco oito dias após o ensaio de absorção capilar. ....	172
Figura 185 – Permissividade das argamassas de referência oito dias após o ensaio de absorção capilar.....	173
Figura 186 - Permissividade das argamassas contaminadas com cádmio oito dias após o ensaio de absorção capilar.....	173
Figura 187 - Permissividade das argamassas contaminadas com cromo oito dias após o ensaio de absorção capilar.....	174
Figura 188 - Permissividade das argamassas contaminadas com chumbo oito dias após o ensaio de absorção capilar.....	174
Figura 189 - Permissividade das argamassas contaminadas com zinco oito dias após o ensaio de absorção capilar.....	175
Figura 190 - Impedância das argamassas de referência 28 dias após o ensaio de absorção capilar.....	176
Figura 191 – Impedância das argamassas contaminadas com cádmio 28 dias após o ensaio de absorção capilar.....	176
Figura 192 – Impedância das argamassas contaminadas com cromo 28 dias após o ensaio de absorção capilar.....	177
Figura 193 – Impedância das argamassas contaminadas com chumbo 28 dias após o ensaio de absorção capilar.....	177
Figura 194 – Impedância das argamassas contaminadas com zinco 28 dias após o ensaio de absorção capilar.....	178
Figura 195 - Espectros de impedância das argamassas de referência 28 dias após o ensaio de absorção capilar.....	178
Figura 196 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com cádmio 28 dias após o ensaio de absorção capilar. ....	179
Figura 197 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com cromo 28 dias após o ensaio de absorção capilar.....	179
Figura 198 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com chumbo 28 dias após o ensaio de absorção capilar. ....	180
Figura 199 – Espectros de impedância das argamassas contaminadas com zinco 28 dias após o ensaio de absorção capilar. ....	180



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens dos ensaios de Lixiviação. ....	40
Tabela 2 – Valores de resistência e capacitância ao longo do período de cura das pastas de cimento. ....	50
Tabela 3 - Características do cimento CP V_ ARI. ....	69
Tabela 4 - Fórmulas químicas dos nitratos utilizados para a contaminação. ....	70
Tabela 5 - Denominação das amostras. ....	70
Tabela 6 – Grau de mobilidade dos contaminantes. ....	78
Tabela 7 - Densidade das argamassas no estado fresco e endurecido. ...	81
Tabela 8 – Concentrações dos metais encontrados nas argamassas. ....	83
Tabela 9 – pH do líquido lixiviante do ensaio de lixiviação (NBR 10005). ....	126
Tabela 10 - Condutividade elétrica do líquido lixiviante (NBR 10005). ....	126
Tabela 11 - pH das amostras líquidas após o ensaio de solubilização. ....	135
Tabela 12 - Condutividade elétrica das amostras líquidas após o ensaio de solubilização. ....	136
Tabela 13 - Taxa de mobilidade das argamassas de referência. ....	142
Tabela 14 - Taxa de mobilidade das argamassas contaminadas com cádmio. ....	148
Tabela 15 - Taxa de mobilidade das argamassas contaminadas com cromo. ....	154
Tabela 16 - Taxa de mobilidade das argamassas contaminadas com chumbo. ....	159
Tabela 17 - Taxa de mobilidade das argamassas contaminadas com zinco. ....	164
Tabela 18 - Sorptividade das argamassas. ....	166
Tabela 19- Tortuosidade das argamassas. ....	181



## SUMÁRIO

RESUMO .....	
ABSTRACT .....	
LISTA DE FIGURAS .....	
LISTA DE TABELAS .....	
1 INTRODUÇÃO .....	29
1.1 OBJETIVOS.....	31
1.1.1 Objetivo Geral.....	31
1.1.2 Objetivos específicos.....	31
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
2.1 METAIS PESADOS .....	33
2.1.1 Definição.....	33
2.1.2 Interação dos metais pesados com a matriz cimentícia	33
2.2 MÉTODOS DE LIXIVIAÇÃO .....	37
2.2.1 Determinação da concentração máxima (NBR 10005)	37
2.2.2 Determinação da difusividade ( <i>Tank Test</i> ).....	38
2.2.3 Vantagens e desvantagens dos testes de lixiviação .....	39
2.3 MEDIDAS ELÉTRICAS PARA AVALIAR ESTRUTURAS POROSAS E O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS .....	40
2.3.1 Impedância Elétrica.....	40
2.3.2 Condutividade Elétrica.....	52
2.3.3 Resistência Elétrica .....	53
2.3.4 Resistividade Elétrica.....	54
2.3.5 Permissividade Elétrica.....	55
2.4 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA LIBERAÇÃO DOS METAIS PESADOS DAS MATRIZES CIMENTÍCIAS E NAS MEDIDAS ELÉTRICAS.....	56
2.4.1 Porosidade .....	56
2.4.2 Tortuosidade.....	58

2.4.3	Difusividade.....	61
2.4.4	Absorção:.....	64
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	67
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS.....	68
3.2.1	Cimento.....	69
3.2.2	Metais Pesados.....	70
3.3	MÉTODOS.....	70
3.3.1	Índice de vazios.....	71
3.3.2	Análise química das argamassas contaminadas.....	72
3.3.3	Impedância Elétrica.....	72
3.3.4	Ensaio de lixiviação da NBR 10005.....	75
3.3.5	Ensaio de Solubilização.....	76
3.3.6	Ensaio de Tanque ( <i>Tank Test</i> ).....	76
3.3.7	Absorção de água por capilaridade.....	78
3.3.8	Tortuosidade.....	79
4	RESULTADOS.....	81
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	81
4.2	ANÁLISE QUÍMICA.....	82
4.3	IMPEDÂNCIA ELÉTRICA.....	83
4.3.1	Argamassas de referência.....	84
4.3.2	Cádmio.....	90
4.3.3	Cromo.....	96
4.3.4	Chumbo.....	103
4.3.5	Zinco.....	109
4.4	LIXIVIAÇÃO – NBR 10005.....	117
4.5	ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO.....	127
4.6	ENSAIO DE TANQUE.....	136
4.6.1	Argamassas de referência.....	137

4.6.2	Cádmio .....	142
4.6.3	Cromo.....	148
4.6.4	Chumbo.....	154
4.6.5	Zinco .....	159
4.7	ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE .....	164
4.8	IMPEDÂNCIA ELÉTRICA APÓS O ENSAIO DE ABSORÇÃO CAPILAR .....	167
4.8.1	Ensaio de impedância realizado oito dias após o ensaio de absorção.....	167
4.8.2	Ensaio de impedância realizado 28 dias após o ensaio de absorção	175
4.9	TORTUOSIDADE .....	181
5	CONCLUSÃO .....	183
6	BIBLIOGRAFIA.....	185
	APÊNDICES.....	193
	APÊNDICE 1 - Tabelas com as concentrações de todos os elementos químicos liberados durante o ensaio de tanque.....	194
	APÊNDICE 4 – Mecanismos de lixiviação .....	213
	APÊNDICE 5 – pH durante o ensaio de tanque .....	220



## 1 INTRODUÇÃO

Os materiais de construção são avaliados quanto ao seu desempenho mecânico, durabilidade e mais recentemente, quanto ao risco de contaminação ambiental, por meio da lixiviação dos metais pesados.

Após a incorporação de resíduos contaminados, e sua estabilização em matrizes cimentícias, o controle da mobilidade dos poluentes deve ser verificado para não ocorrer contaminação ambiental.

A incorporação dos resíduos possibilita a origem de novos materiais de construção, diminui o consumo de matérias - primas naturais e tem por finalidade solidificar ou encapsular (fisicamente ou quimicamente) os metais pesados, efetivando a retenção dos mesmos. Os materiais estabilizados e solidificados podem se tornar uma fonte de poluição no meio onde ficarão estocados ou, nos materiais onde foram valorizados.

A liberação de contaminantes se dará pelo contato dos produtos estabilizados com o meio líquido (água). Para tanto, o controle da liberação dos contaminantes deve ser realizado de forma a se poder identificar a mobilidade destes poluentes, presentes nas matrizes cimentícias, comprovando-se ou não, a eficiência da retenção dos mesmos.

Na análise da retenção, têm sido empregados os métodos de lixiviação que auxiliam na avaliação da liberação da concentração máxima dos elementos tóxicos. Tais métodos normalmente empregam técnicas destrutivas, e são baseadas no princípio de uma maior exposição do contaminante à água. Os procedimentos de lixiviação são restritos ao ambiente de laboratório e mostram alguns requisitos exigíveis para a obtenção dos extratos lixiviados de resíduos sólidos, para diferenciá-los em resíduos perigosos ou não perigosos. No Brasil, o teste de lixiviação é normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, a NBR 10005 (2004) – “Procedimento para Obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos”. A NBR 10006 (2004) é aplicada para obtenção de extratos solubilizados dos resíduos sólidos, classificando-os como inertes ou não inertes.

As normas brasileiras avaliam os elementos tóxicos que são liberados dos materiais de construção e não possibilitam um estudo da

concentração dos elementos tóxicos que permanecem nos materiais após a sua submissão ao ensaio de lixiviação ou solubilização. No ensaio de tanque, as difusividades dos elementos são avaliadas ao longo de 64 dias de ensaio. No entanto, o ensaio refere-se a uma concentração máxima de metais pesados, disponível no material, que pode ser liberada durante o ensaio. Esta concentração varia em função do pH e outros parâmetros físicos e dificilmente pode ser encontrada com esta metodologia.

Para encontrar a concentração máxima disponível que pode efetivamente lixiviar dos materiais é necessário fazer uma avaliação do material. Nesse sentido, pretendeu-se usar as medidas de impedância elétrica para auxiliar na identificação do conteúdo máximo que pode lixiviar de uma matriz cimentícia, fazendo-se uso de medições dos materiais antes, durante e após o processo de lixiviação.

Além de contribuir para a análise da contaminação presente nos materiais sólidos (o que não é possível nos ensaios de lixiviação), as medidas elétricas demandam um tempo de realização dos ensaios muito menor do que os ensaios de lixiviação.

As medidas elétricas são utilizadas no estudo dos solos para verificar a compactação e seu nível de degradação e a presença ou ausência de leitos de água subterrâneos. Na construção civil, as medidas elétricas são aplicadas em concretos, para o estudo da penetração de íons de cloro nos mesmos e avaliar o nível de corrosão das armaduras, em estruturas de concreto armado.

Devido a sua natureza heterogênea (fases sólida, líquida e gasosa), as matrizes cimentícias necessitam de uma análise conjunta de diversas propriedades elétricas como: condutividade elétrica, resistividade, impedância e reatância. Estas propriedades elétricas permitem avaliar a formação microestrutural dos materiais e podem ser relacionadas com alguns parâmetros e fenômenos físicos como: a porosidade, a carbonatação, a tortuosidade, a difusividade e a absorção.

Portanto, argamassas contaminadas serão avaliadas de acordo com as suas impedâncias elétricas antes e durante os ensaios de lixiviação, para analisar a concentração dos metais pesados ainda remanescente no material monolítico. A evolução do tempo de cura das argamassas, que influencia na liberação dos metais, foi acompanhada também por meio de medidas elétricas. Dessa forma, esta pesquisa procurou contribuir na identificação do potencial de uso das técnicas elétricas para auxiliar na identificação da concentração dos metais pesados e dos principais parâmetros que afetam a liberação dos



poluentes como a porosidade, a tortuosidade e a difusividade dos poluentes.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da presença dos metais pesados nas medidas de impedância elétrica em matrizes cimentícias.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Relacionar a impedância elétrica com a presença dos metais pesados (cromo, chumbo, zinco e cádmio) nas argamassas nas contrações de 20, 40, 80 e 160 ppm;
- Avaliar a porosidade, difusividade e tortuosidade das argamassas que influenciam na liberação dos contaminantes por meio da impedância elétrica;
- Avaliar a evolução do processo de hidratação do cimento, das argamassas contaminadas, por meio da impedância elétrica;
- Relacionar a absorção capilar com a porosidade, tortuosidade e a impedância elétrica;
- Avaliar a liberação dos contaminantes, utilizando os ensaios de lixiviação e a impedância elétrica.

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos. O capítulo 1 consiste na introdução e objetivos desta pesquisa. No capítulo 2 são apresentados os métodos de lixiviação utilizados nesta pesquisa, alguns conceitos referentes às medidas elétricas e os parâmetros físicos que interferem na liberação dos metais pesados das matrizes cimentícias e nas medidas elétricas. O capítulo 3 aborda os materiais e métodos utilizados para a viabilização da pesquisa. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e no quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com este estudo.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O primeiro item deste capítulo é destinado à definição dos metais pesados e as suas interações com os materiais cimentícios. No item 2.2 são apresentados os métodos de lixiviação utilizados nesta pesquisa. O item 2.3 deste capítulo aborda os parâmetros físicos que influenciam na liberação dos metais pesados das matrizes cimentícias e nas medidas elétricas. O item 2.4 define as propriedades elétricas que foram estudadas neste trabalho.

### 2.1 METAIS PESADOS

#### 2.1.1 Definição

Os metais pesados são definidos ambientalmente como os metais de efeito tóxico aos seres vivos e quimicamente são os elementos que apresentam maior densidade atômica.

#### 2.1.2 Interação dos metais pesados com a matriz cimentícia

O cimento é um aglomerante utilizado para o processo de solidificação, fixação e estabilização dos elementos tóxicos (JANUSA *et al.*, 2000; CHEN *et al.*, 2009).

Os metais pesados são encontrados em resíduos de construção e demolição. Altos níveis de Cu e Ni são oriundos de resíduos de construção e demolição metálicos e Cr e Pb de plásticos (ZHANG *et al.* 2008).

Os resíduos cerâmicos, provenientes de telhas, pigmentadas de vermelho e branco, possuem grande quantidade de metais pesados como titânio, manganês, zinco, zircônio, chumbo, cromo, vanádio, cobalto, níquel, cobre, arsênio e cádmio (PUERTAS *et al.*, 2008).

Os vidros reciclados foram incorporados na produção de cimento e em concretos. Estes resíduos contêm elementos como o zinco, boro, magnésio, chumbo e estrôncio (SHI e ZHENG, 2007).

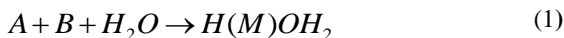
Quanto à madeira reutilizada, as suas cinzas substituem parcialmente o cimento. Estas cinzas são decorrentes de casca de eucalipto, casca de carvalhos, pinheiros de Natal, serragem e resíduos florestais. Este tipo de subproduto obtém magnésio e titânio (BAN e RAMLI, 2011).

A incorporação dos resíduos em matrizes cimentícias é estudada para evitar a liberação dos metais pesados dos resíduos para o meio ambiente. Assim, os metais participam das reações químicas de hidratação dos compostos do cimento e/ou são aprisionados fisicamente na microestrutura do material sólido.

A imobilização dos metais pesados, nos materiais cimentícios, pode ser relacionada ao confinamento físico, à fixação química, à substituição iônica ou à sorção (BONEN e SARKAR, 1995). A sorção é somente um processo físico, no qual, os contaminantes podem ser absorvidos ou adsorvidos. No processo de absorção, um sólido pode absorver um líquido ou líquido pode absorver os gases. Na adsorção, ocorre uma adesão física ou ligação de íons e moléculas, em outras moléculas.

No estudo de imobilização dos metais pesados, Pb, Cr, Cu, Zn, Cd e Mn, estes elementos foram misturados aos aglomerantes na forma de sais, nitratos e alguns reagiram com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , produto da hidratação do cimento, formando aluminatos de cálcio e silicatos hidratados. Conseqüentemente, os cristais destes novos produtos, preencheram os espaços vazios dos poros, diminuindo a porosidade e aumentando a durabilidade das pastas de cimento (GIERGICZNY e KRÓL, 2008).

Murat e Sorrentino (1996) definiram dois mecanismos de solidificação descritos na (1 e na (2).



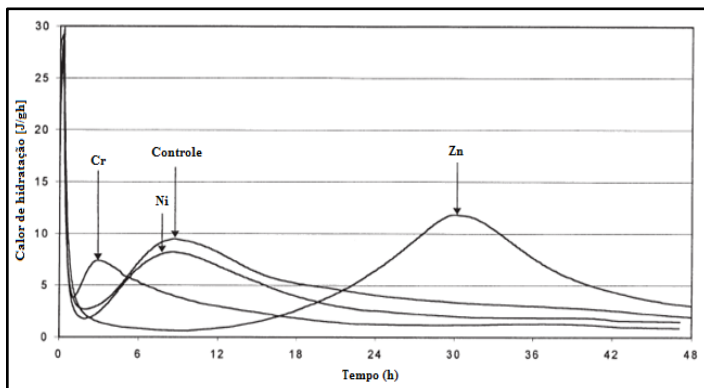
Onde, A e B são os componentes anidros; M é o metal a ser fixado;  $H(M)OH_2$  é o componente hidratado contendo o metal;  $AB(M)$  representa os componentes anidros contendo o metal.

Na (2) o produto  $AB(M)$  é inerte. Na (1) ocorre a estabilização do metal por meio dos componentes hidratados.

No processo de estabilização dos metais através da solidificação, com adição de cimento, considera-se a (1) como a hipótese mais adequada.

Wang e Vipulanandan (1999) adicionaram  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  em pastas de cimento Portland e constataram que o Cr (VI) foi solidificado. Por meio da análise de difração de raios-X (DRX), verificou-se que o cromo inibiu o processo de hidratação do cimento através da sua reação com o  $\text{Ca}^{2+}$ . Um dos produtos da reação identificado foi o  $\text{CaCrO}_4$ , o cromato de cálcio, que possui baixa solubilidade.

Em amostras contaminadas com Cr, Ni e Zn, nas concentrações entre 200 a 25000 ppm, o cromo acelerou o processo de hidratação e o zinco provocou efeito contrário. Os autores iniciaram a pesquisa do calor de hidratação com 200 ppm dos metais em relação a quantidade de cimento e observaram que somente acima da concentração de 5000 ppm é que o cromo mostrou uma leve aceleração da hidratação, possível de ser detectada (Figura 1).



**Figura 1 – Calor de hidratação de pastas de cimento contaminadas com cromo, níquel e zinco.**

Fonte: Adaptado Stephan *et al.* (1999).

O cádmio é um elemento químico que tem como símbolo Cd e que faz parte do grupo IIb da Tabela Periódica.

Halim *et al.* (2003) realizaram testes de microanálise de elétrons para a detecção do cádmio em resíduos cimentícios depositados em aterros sanitários. O cádmio incorporado à matriz de cimento, apareceu na forma de hidróxido ( $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ) ou carbonato de cádmio ( $\text{CdCO}_3$ ). O hidróxido de cálcio encontrado estava precipitado nos poros da matriz cimentícia ou adsorvido na superfície do C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado).

O Cd também pode interagir quimicamente com o hidróxido de cálcio formando  $\text{CdCa}(\text{OH})_4$  (CONNER, 1990 e PARK, 2002).

Murat e Sorrentino (1996) verificaram que 22% do cádmio inserido em pastas de cimento foram fixados em compostos do aglomerante e o dobro deste percentual se fixou nos aluminatos de cálcio. O Cd foi encontrado na forma de óxido ( $\text{CdO}$ ) e hidróxido ( $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ).

Este metal maleável e resistente é mal condutor de eletricidade. Seu número atômico é 82 e o símbolo químico é Pb, no latim é denominado *plumbum*.

Halim *et al.* (2003) verificaram que a liberação de chumbo das matrizes cimentícias foi similar a liberação de silício. O Pb se incorporou a matriz de C-S-H. Quando a matriz se dissolveu, com a incorporação de ácidos (nitríco e acético), o Si e o chumbo foram liberados.

Do grego *Chroma*, “cor”, o **chromo** recebeu essa denominação pela grande variabilidade da coloração dos compostos, desde o verde da esmeralda, até o vermelho do rubi. O **chromo**, cujo símbolo é **Cr**, pertence ao grupo VIa da tabela periódica.

Palomo e Palacios (2002) produziram pastas de cimento Portland contaminadas com óxido de cromo e nitrato de chumbo. Nas pastas de cimento foi verificado um decréscimo do pico de portlandita na difração de raios-X. No entanto, não se verificou nenhuma fase cristalina composta de cromo ou de chumbo.

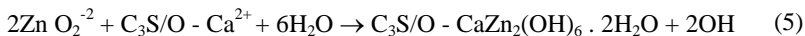
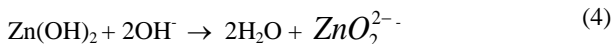
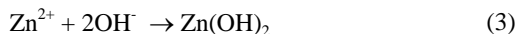
Halim *et al.* (2003), notificaram que o **Cr**, em presença do **cálcio**, formou um precipitado, o cromato de cálcio (**CaCrO<sub>4</sub>**), durante o processo de hidratação ou adsorção dos íons cromatos na matriz de C-S-H.

Após a adição de **K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>** às pastas de cimento, nas concentrações de 0,5%, 2% e 5%, em relação à massa de cimento, o **Cr (VI)** foi estabilizado (Wang e Vipulanandan, 1999). Com a análise de difração de raios-X (DRX), verificou-se que o **chromo** inibiu o processo de hidratação do cimento devido a sua reação com o Ca<sup>2+</sup>. Um dos produtos da reação identificado foi o **CaCrO<sub>4</sub>**, o cromato de cálcio, que possui baixa solubilidade. No processo de hidratação do cimento, com a presença do **Cr (VI)**, parte do Ca<sup>2+</sup> do cimento reagiu com **CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>**.

O metal zinco, cujo símbolo é **Zn**, possui número atômico igual a 30, cor azulada e cinzenta. Disponível em pó, chapas, grânulos, frágil a temperatura ambiente, maleável e razoável condutor de eletricidade.

Murat e Sorrentino (1996) adicionaram zinco às pastas de cimento e verificaram que a metade da quantidade de **zinco** adicionado se fixou nas fases alita, belita, C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF, compostos do cimento Portland. O tamanho dos cristais da fase alita, aumentou conforme aumentou a adição do óxido de zinco, apresentando aluminato de zinco nas micrografias.

Chen *et al.* (2007) citam que o zinco (Zn<sup>2+</sup>) retardou a hidratação inicial da fase alita, do cimento (C<sub>3</sub>S), cujas reações de interação são apresentadas nas equações abaixo:



De acordo com a sequência das reações apresentadas na (3), na (4) e na (5), o zinco reage com os íons hidroxilas, formando hidróxidos. Os hidróxidos de zinco continuam reagindo com os íons hidroxilas originando óxidos. Os óxidos de zinco reagem com o silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S) e a água, incorporando o zinco nas moléculas de hidróxido de cálcio.

## 2.2 MÉTODOS DE LIXIVIAÇÃO

Os ensaios de lixiviação têm o objetivo de avaliar a quantidade de elementos tóxicos disponíveis para lixiviar dos materiais cimentícios para o ambiente. A lixiviação é governada essencialmente pela difusão. Quanto maior a difusão das amostras, maior será a liberação de substâncias tóxicas. A seguir são apresentados e discutidos alguns tipos de ensaios de lixiviação e suas respectivas normas.

### 2.2.1 Determinação da concentração máxima (NBR 10005)

Este ensaio de lixiviação também é conhecido como o ensaio TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*) descrito pela norma americana US EPA Method 1311 (2001). O ensaio consiste na determinação de uma solução de extração, na qual a amostra granular será submersa, dependendo do pH da amostra. A solução de extração e a amostra granular (diâmetro das partículas  $\leq 9,5$  mm) são colocadas juntamente dentro de um cilindro que permanece rotacionando durante 18 horas. Após este período de tempo o conjunto é filtrado e a amostra líquida é analisada por energia dispersiva de raios-X.

Townsend *et al.* (2002) citam que a lixiviação do tipo TCLP é um método de lixiviação utilizado por agências regulamentadoras para estabelecer os critérios de toxicidade de vários elementos químicos. Neste ensaio, sempre há uma razão líquido/sólido (L/S) estabelecida. Com o aumento da relação L/S, aumenta o contato da água com as partículas sólidas e maior será a lixiviação dos contaminantes provenientes dos resíduos.

Poon e Lio (1997) utilizaram o ácido acético como solução de extração no ensaio do tipo TCLP. Este ácido têm por finalidade, simular o ácido orgânico presente em muitos aterros, decorrentes da decomposição do lixo misturado aos resíduos sólidos. Os autores afirmam que o TCLP é utilizado para comparar a eficiência de diferentes processos de estabilização/solidificação de resíduos.

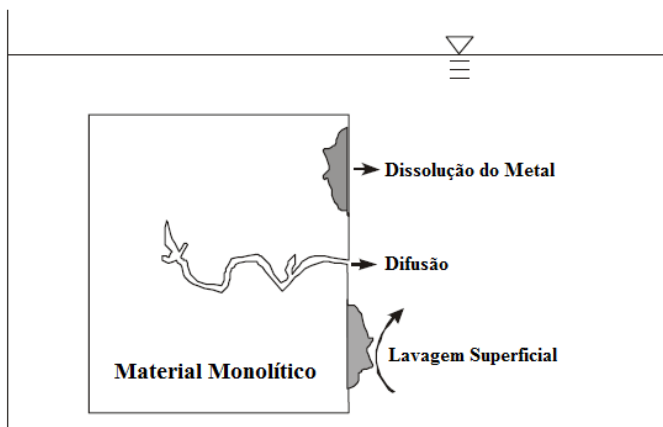
No Brasil, este ensaio de TCLP é descrito e regulamentado pela NBR 10005 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos (2004).

### **2.2.2 Determinação da difusividade (*Tank Test*)**

O ensaio de tanque, ou *Tank Test*, é o ensaio de lixiviação indicado para materiais monolíticos. Conforme norma holandesa, NEN 7375, as amostras permanecem durante 64 dias em tanques, contendo água deionizada e desmineralizada. Após o primeiro contato do corpo de prova com a água, sucedem-se oito extrações do líquido e sua renovação. Da amostra líquida medem-se o pH, a condutividade e realizada a identificação dos elementos que sofreram lixiviação. As extrações acontecem após as primeiras 6 horas (seis horas) de imersão dos corpos de prova e seguem após 24h, 54h e 4, 9, 16, 36 e 64 dias. Os intervalos de tempo são crescentes e a renovação do líquido nos tanques garante um gradiente de concentração de íons entre a matriz sólida e o líquido, para que ocorra a difusão dos íons.

No ensaio de tanque há algumas formas de liberação dos contaminantes, como: lavagem superficial, lixiviação por difusão e dissolução (Figura 2). Estas liberações dependem da localização dos metais dentro da amostra monolítica e das características estruturais e microestruturais do material monolítico.





**Figura 2 - Formas de liberação dos contaminantes no ensaio de tanque.**

**Fonte:** Adaptado de Groot. e Slood (1992).

A análise da cinética de liberação dos contaminantes determina qual destas formas de lixiviação foi preponderante durante o ensaio de tanque.

De acordo com a norma holandesa NEN 7375, essa determinação é possível a partir de três critérios:

- Inclinação da melhor reta do gráfico  $\log \epsilon$  [ $\text{mg}/\text{m}^2$ ] x  $\log$  tempo [h]; se a inclinação for menor do que 0,35, o mecanismo de lixiviação se resume em lavagem superficial; para inclinações maiores do que 0,65, a lixiviação dos contaminantes acontece por dissolução; para que ocorra a difusão, este coeficiente deve compreender entre 0,35 e 0,65.
- Fator de concentração;
- $R^2$  do gráfico  $\log \epsilon$  [ $\text{mg}/\text{m}^2$ ] x  $\log$  tempo [h].

### 2.2.3 Vantagens e desvantagens dos testes de lixiviação

Algumas propriedades físico-químicas podem influenciar nos ensaios de lixiviação. Assim, algumas destas propriedades, como pH, razão líquido/sólido, tamanho das partículas, dentre outras, devem ser mantidas constantes ou controladas para não interferirem nos testes. Na Tabela 1 estão apresentadas as desvantagens e também as vantagens dos ensaios de lixiviação.

**Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens dos ensaios de Lixiviação.**

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classificam um resíduo como perigoso ou não perigoso;</li> <li>• Avaliam o potencial de liberação de poluentes, provenientes dos resíduos sob condições ambientais específicas;</li> <li>• Medem a eficácia de um tratamento ao qual é submetido o resíduo;</li> <li>• Avaliam a gestão ou a disposição mais apropriada dos resíduos;</li> <li>• Determinam os parâmetros cinéticos que modelam o transporte dos contaminantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensaio destrutivo e restrito ao ambiente de laboratório;</li> <li>• O ensaio pode ser influenciado pelo tamanho da partícula, tempo de contato, homogeneidade, razão líquido/sólido, porosidade, temperatura, tipo de fluxo, etc.</li> <li>• Alguns fatores químicos-biológicos também podem afetar o ensaio: pH, precipitação, alcalinidade, teor de carbono orgânico, etc.</li> </ul>

**Fonte:** TOWNSEND, JANG e TOLAYMAT (2003).

A principal desvantagem dos ensaios de lixiviação é a impossibilidade de realizar a detecção dos contaminantes nas argamassas submetidas ao ensaio, uma vez que a análise nestes testes é realizada no líquido. Assim, as medidas de impedância elétrica podem contribuir para a análise dos elementos tóxicos, remanescentes na matriz cimentícia, após a lixiviação.

### 2.3 MEDIDAS ELÉTRICAS PARA AVALIAR ESTRUTURAS POROSAS E O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Nas seções seguintes serão abordadas as propriedades elétricas que auxiliarão na caracterização física e química das argamassas contaminadas com os metais pesados. A partir das medições das propriedades elétricas é possível determinar a porosidade de pastas de cimento (CABEZA *et al.*, 2006), a tortuosidade em rochas (GARROUCH *et al.*, 2001), a absorção acústica e a condutividade hidráulica em concretos (NEITHALATH *et al.*, 2006), monitorar o processo de hidratação das pastas de cimento e fazer uma investigação microestrutural da mesma (LIAO *et al.*, 2011).

#### 2.3.1 Impedância Elétrica

A medição da impedância elétrica consiste na injeção de uma corrente alternada, multifrequencial, de amplitude constante por meio de eletrodos, de frequência variável (depende do objeto em estudo) e esta técnica é conhecida como Espectroscopia de Impedância Elétrica (EIE).

A impedância elétrica é expressa em ohms, e designada pelo símbolo Z. Indica a oposição total que um circuito oferece ao fluxo de

uma corrente elétrica variável no tempo, ou seja, num circuito de corrente alternada (AC). Matematicamente, a determinação da impedância elétrica é apresentada a (6).

$$Z = \frac{V}{I} \quad (6)$$

Onde,  $Z$  é a impedância, medida em ohms;  $V$  é a diferença de potencial, dada em volts;  $I$  é a corrente elétrica em ampéres.

A impedância também é designada por meio da (7).

$$Z = Z_L + Z_C \quad (7)$$

$$Z_L = j\omega L \quad (8)$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (9)$$

Onde:

$Z_L$  é a impedância indutiva (ohm);

$Z_C$  é a impedância capacitiva (ohm);

$j$  é a parte imaginária da impedância, equivale  $(-1)^{1/2}$ ;

$\omega$  é a frequência do circuito (rad);

$L$  é a indutância (Henry);

$C$  é a capacitância (Faraday).

Em circuitos compostos por indutores e capacitores, em série ou em paralelo, inserindo a (8) e a (9) na (7), verifica-se que a impedância será inversamente proporcional à frequência aplicada no circuito.

Aplicando-se numa argamassa uma tensão alternada  $V(t)$  de frequência angular  $\omega$ , tem-se como resposta uma corrente alternada  $I(t)$  e o ângulo  $\theta(t)$  é a defasagem entre a tensão e a corrente. Se a corrente está adiantada em relação à tensão, tem-se a impedância capacitiva e se a corrente está atrasada, diz-se impedância indutiva. Para o cálculo da resistência e da reatância, a partir da impedância, têm-se as fórmulas da (10) e (11).

$$R = |Z| \times \cos \theta \quad (10)$$

$$X = |Z| \times \sin \theta \quad (11)$$

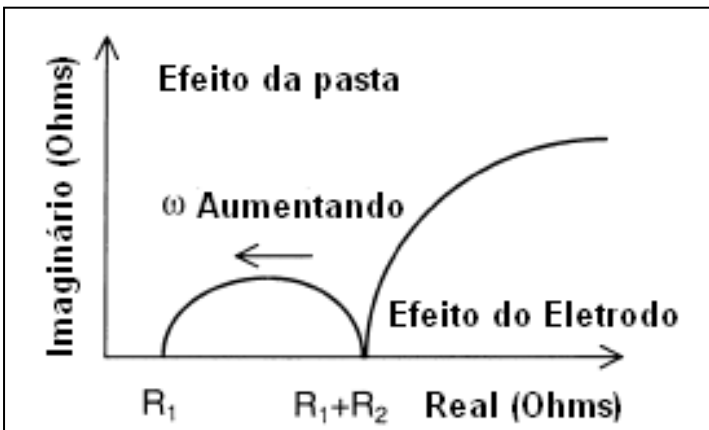
A impedância é expressa como um número complexo, possuindo uma parte real, equivalente a resistência  $R$ , e uma parte imaginária, dada pela reatância  $X$ . A reatância depende, além de outras grandezas, da

frequência aplicada ao circuito. Quanto maior a frequência, menor a reatância. A resistência elétrica é a oposição de um material em conduzir a corrente elétrica, como poderá ser mais bem elucidado no capítulo seguinte. A reatância é a resistência oferecida à passagem de uma corrente alternada, por um indutor ou capacitor. Quando a reatância é menor do que zero, diz-se reatância capacitiva. Para os valores positivos da reatância (maiores do que zero), diz-se que a reatância é indutiva. Enfim, quando a reatância é igual a zero, a impedância é igual à resistência ôhmica e o circuito é dito como puramente resistivo.

O gráfico resultante do espectro da impedância elétrica, o gráfico Nyquist, é resultante de um plano complexo (real e imaginário). O espectro descreve um arco simples numa frequência mais alta, com uma pequena parte de um arco numa região de frequência relativamente mais baixa.  $Z'$  (resistência elétrica), no eixo das abscissas é a parte real, e  $Z''$  (reatância elétrica), no eixo das ordenadas, é a parte imaginária da impedância elétrica.

Por meio dos espectros de impedância é possível avaliar as propriedades dielétricas dos materiais. Estas propriedades, numa pasta de cimento, são governadas por dois aportes: a fase sólida e o eletrólito dentro dos poros (ANDRADE C. *et al.*, 1999).

O espectro de impedância tem informações que podem ser usadas para caracterizar a microestrutura dos materiais cimentícios. Um espectro de impedância típico de uma pasta de cimento hidratada é representado num plano complexo real imaginário (Figura 3).

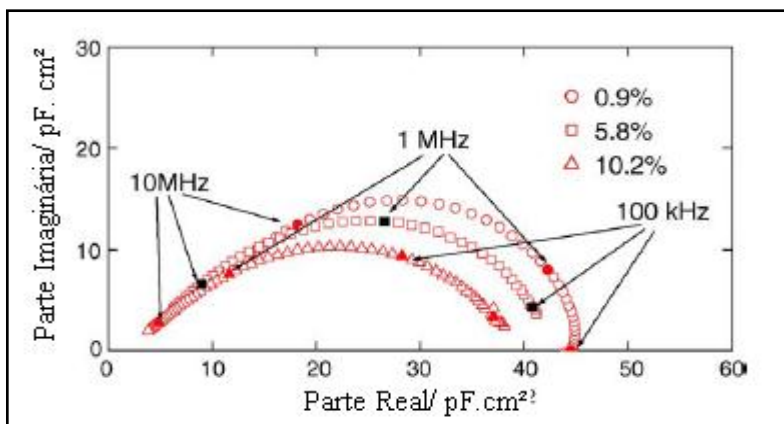


**Figura 3 – Espectro de Impedância esquemático para uma corrente alternada.**

**Fonte:** Adaptado de XU *et al.*, 2000.

Onde  $(R_1 + R_2)$ , a interseção do arco de alta frequência com o eixo real (Figura 3) representa a resistência total da amostra. E  $R_1$  é considerada a resistência elétrica da interface entre o eletrodo e a amostra.

As propriedades dielétricas refletem claramente no desenvolvimento da estrutura porosa e no grau de preenchimento dos poros pelo eletrólito (CABEZA *et al.*, 2006). Para as pastas de cimento com a estrutura porosa totalmente desenvolvida (tempo de cura > 28 dias), quando todos os poros estão preenchidos pelo eletrólito, o principal fator característico é a assimetria do arco, observado no espectro de impedância. Quando as amostras são secas ou a estrutura porosa não está totalmente desenvolvida (tempo de cura < 15 dias), a dispersão assimétrica diminui e a dispersão simétrica passa a ser mais relevante. Esta comparação pode ser verificada na Figura 4, onde o percentual de perda de massa das pastas reflete na simetria do arco, característico do espectro de impedância.

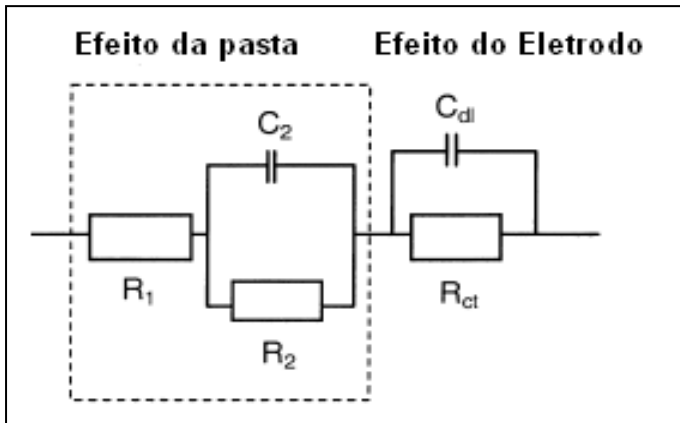


**Figura 4 - Avaliação da simetria nos espectros de impedância.**

Fonte: Adaptado de CABEZA *et al.*, 2006.

Os materiais cimentícios podem ser descritos como elementos de um circuito elétrico, representando uma combinação de resistências e capacitâncias em série e em paralelo (CABEZA *et al.*, 2006). Nas camadas de C-S-H gel, que limitam a ocupação dos poros pelo eletrólito, existem duplas camadas de capacitância. Esta capacitância aumenta com o preenchimento dos poros e com a espessura do corpo de prova. Assim, o comportamento da impedância elétrica da interface sólido-líquido no sistema cimentício pode ser modelado como uma

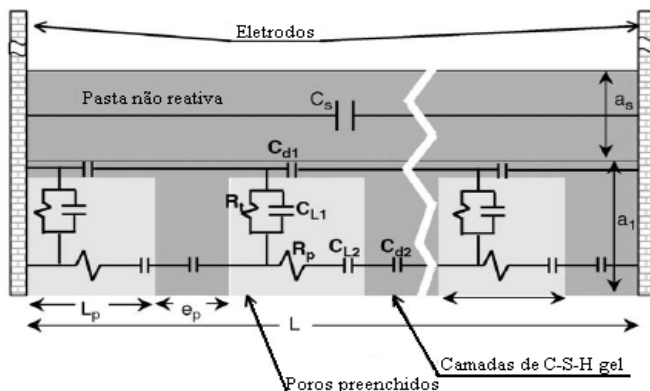
combinação de resistores e capacitores, usando um circuito elétrico equivalente (Figura 5).



**Figura 5 - Circuito Elétrico Equivalente**

**Fonte:** Adaptado de XU *et al.*, 2000.

Cabeza *et al.* (2006) relataram uma análise das parcelas resistivas e capacitivas de uma matriz cimentícia. Segundo os autores, a pasta não reativa (a região da pasta sem poros), é puramente capacitiva (associada a uma resistividade muito alta porque não é porosa). Esta capacitância foi denominada de  $C_s$ . Paralelamente a esta capacitância, foi considerada a contribuição da rede porosa. O elemento desta rede é:  $C_{L1}$ , que representa a dupla camada capacitiva, que compreende as regiões entre a solução dos poros e as camadas de C-S-H gel (em contato com a pasta não reativa). As trocas iônicas que podem ocorrer entre a solução dos poros interligados e a matriz foram resumidas numa parcela resistiva em paralelo com uma capacitiva, respectivamente  $R_1$  e  $C_{L1}$ .  $C_{d1}$  e  $C_{d2}$  tem a mesma natureza; a primeira representou a capacitância da camada de gel em contato com a pasta não reativa e a segunda, a camada de gel entre os poros. Assumiu-se que não ocorre troca iônica entre os poros, logo,  $C_{d2}$  deve ser colocada em série com  $C_{L2}$  e  $R_p$  (dupla camada capacitiva, de mesma natureza que  $C_{L1}$  e a resistência eletrolítica para cada poro, respectivamente). Todo este circuito descrito é demonstrado na Figura 6.



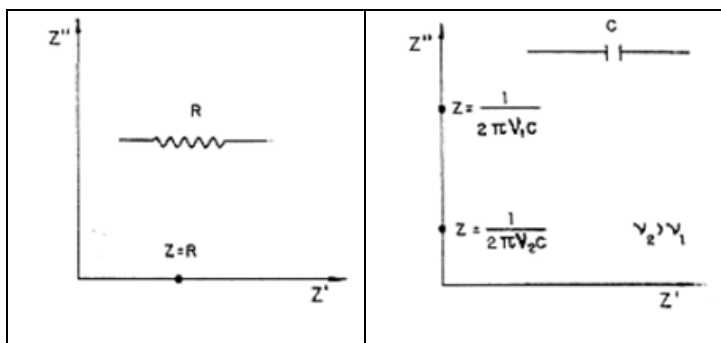
**Figura 6 – Esquema do circuito de uma unidade elementar, numa pasta de cimento.**

Fonte: CABEZA *et al.* (2006).

Sendo que  $a_1$  é a altura dos poros;  $e_p$  é a largura das paredes dos poros;  $L$  é o comprimento total entre os eletrodos;  $L_p$  é o comprimento individual de cada poro;  $a_s$  é a altura da pasta não reativa.

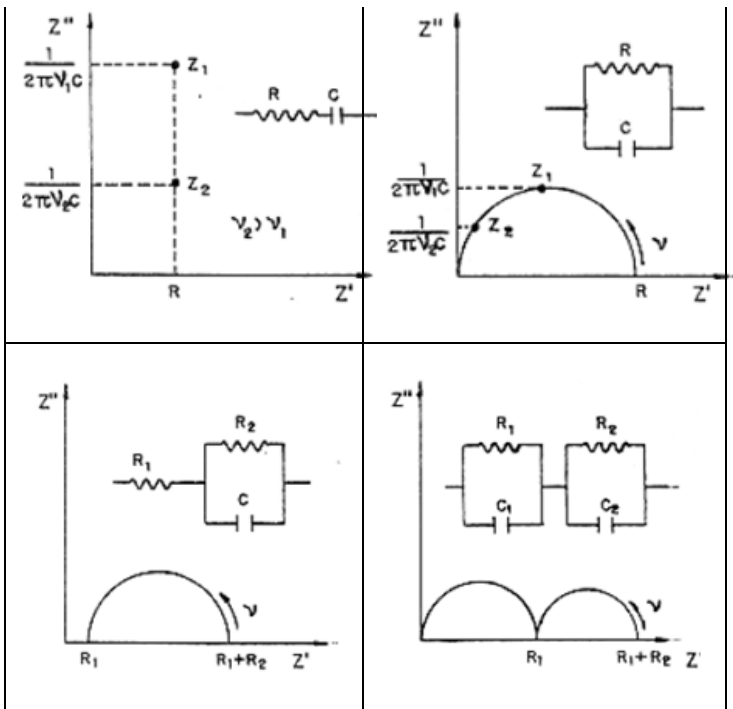
A relação  $a_1/a_s$  define a porosidade da amostra. Ou seja, esta é a relação existente entre a região de vazios e a região preenchida pela matriz (sem poros).

Este circuito da Figura 6 demonstra que para cada região desta unidade elementar da pasta de cimento, há uma associação entre uma parcela resistiva e uma capacitiva. Assim, há várias impedâncias que se manifestam numa só, que caracteriza toda a amostra. Há diferentes formas de associação destas parcelas resistivas e capacitivas. Na Figura 8, alguns destes circuitos equivalentes estão associados aos seus respectivos espectros de impedância.



**Figura 7 - Circuitos equivalentes e os espectros de impedância.**

Fonte: ANTUNES F. C. (2009).



**Figura 8 - Circuitos equivalentes e os espectros de impedância.**

**Fonte:** ANTUNES F. C. (2009).

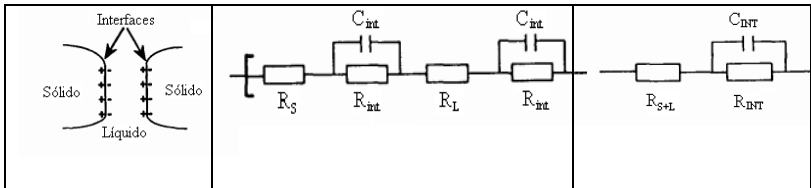
O primeiro espectro de impedância apresentado na Figura 8 representa um material puramente resistivo. Na sequência (da esquerda para a direita e de cima para baixo), os demais espectros representam um material puramente capacitivo, um material composto por uma resistência e um capacitor em série e um material composto por uma resistência e um capacitor em paralelo. Na associação de uma resistência em série com uma resistência e um capacitor em paralelo tem-se um arco deslocado à direita da origem. No último espectro da Figura 8 é representado um material policristalino, com no mínimo dois circuitos RC em paralelo, montados em série.

No espectro de impedância, típico de materiais cimentícios, verificou-se a formação de um arco, cujo diâmetro aumenta com o aumento da idade de cura das pastas. Com a medição da impedância elétrica determina-se a condutividade elétrica. Com a evolução do processo de hidratação, a presença da fase aquosa nos poros capilares é



consumida, alterando a condutividade elétrica das matrizes cimentícias (DOTELLI e MARI, 2001).

Em trabalho apresentado por Gu P. *et al.* (1992), os autores apresentaram um circuito equivalente, para uma unidade elementar de uma pasta de cimento, muito bem definido, como pode ser visto na Figura 9. Onde  $R_s$ ,  $R_{int}$ ,  $R_L$  e  $C_{int}$ , correspondem às resistências do sólido, da região de interface (sólido-líquido) e do líquido (medidas em ohms) e à capacitância da região de interface (medida em Faraday), respectivamente. A impedância de cada camada elementar pode ser expressa por  $n$  unidades de circuitos equivalentes em série. Este múltiplo circuito equivalente pode ser simplificado pelo circuito resultante apresentado na Figura 9.



**Figura 9 – Circuito elétrico equivalente para uma unidade elementar de pasta de cimento.**

**Fonte:** Adaptado de Gu *et al.* (1992).

A impedância de cada camada de pasta pode ser calculada através da (12).

$$Z_C = R_{S+L} + \frac{1}{\left( \frac{1}{R_{INT} + j\omega C_{INT}} \right)} \quad (12)$$

Onde,  $R_{S+L}$  é definida na (13).

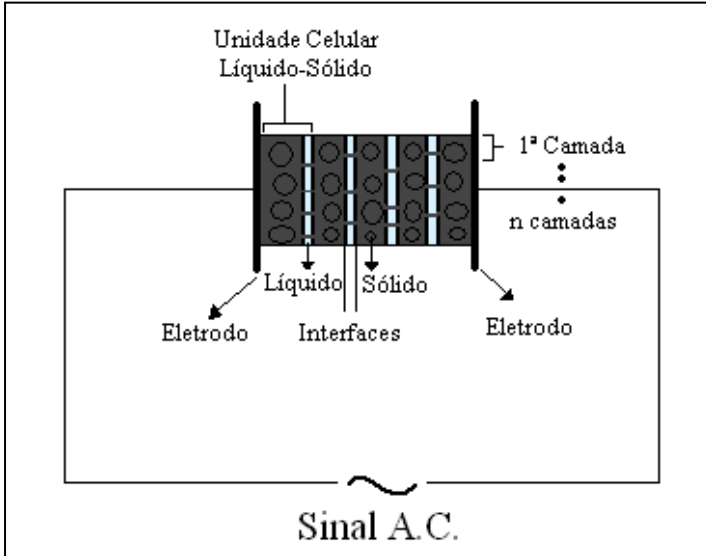
$$R_{S+L} = n(R_S + R_L) \quad (13)$$

E  $R_L$  e  $C_{INT}$  são iguais a ((14 e (15):

$$R_L = 2nR_{int} \quad (14)$$

$$C_{INT} = \frac{C_{int}}{2n} \quad (15)$$

Neste caso,  $j$  será a componente do plano imaginário ( $-1^{0.5}$ ) e  $\omega$  a frequência angular (rad).  $R$  é a resistência (ohm),  $C$  é a capacitância (Faraday) e  $n$  é o número de camadas elementares como mostra a Figura 10.



**Figura 10 – Camadas do corpo de prova de acordo com a aplicação do campo elétrico.**

**Fonte:** Adaptado de Gu *et al.* (1992).

Para o cálculo da impedância elétrica total ( $Z_T$ ) tem-se  $n$  camadas em paralelo, de acordo com a Figura 10. E  $Z_T$  pode ser definida na (16).

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{Z_{L1}} + \frac{1}{Z_{L2}} + \dots + \frac{1}{Z_{Ln}} \quad (16)$$

Logo,  $Z_T$  será ((17):

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{n}{Z_L} \therefore Z_T = \frac{Z_L}{n} \quad (17)$$

Xie *et al.* (1994) comentaram que os arcos desenvolvidos no espectro de impedância de um sistema cimentício não se desenvolveram até certo tempo decorrido do processo de hidratação das pastas de cimento. Para tanto, foram calculados os valores da resistência elétrica

referente à interface sólido/eletrodo, denominada por eles de resistência de compensação ( $R_1$ ) e a resistência elétrica total das pastas,  $R_2$  (ponto no qual o arco de maior frequência corta o eixo das abscissas, num espectro de impedância), por meio da (18) e da (19):

$$R_1 = \frac{L}{S} \frac{1}{\psi_p} \frac{1}{\sigma_l} \quad (18)$$

$$R_2 = k \frac{L}{S} \frac{\delta}{P r_0} \frac{1}{\sigma_f} \quad (19)$$

Onde,  $L$  e  $S$  são o comprimento (m) e a área da amostra (m<sup>2</sup>), respectivamente;  $P$  e  $r_0$  são a porosidade (%) e o raio médio dos poros (m);  $\sigma_l$  e  $\sigma_f$  são as condutividades elétricas (S/m) da solução dos poros e da região de interface líquido/sólido;  $\delta$  é a espessura desta região de interface (m);  $\psi_p$  é a área da fração de poros (m<sup>2</sup>) na seção transversal da amostra e  $k$  é o coeficiente que depende da geometria dos poros.

De acordo com a (18) e a (19), ambas  $R_1$  e  $R_2$  diminuíram linearmente com a espessura da amostra. O arco da maior frequência desaparece quando a espessura da amostra é reduzida para certo valor crítico e  $R_2$  é indetectável (Figura 11).

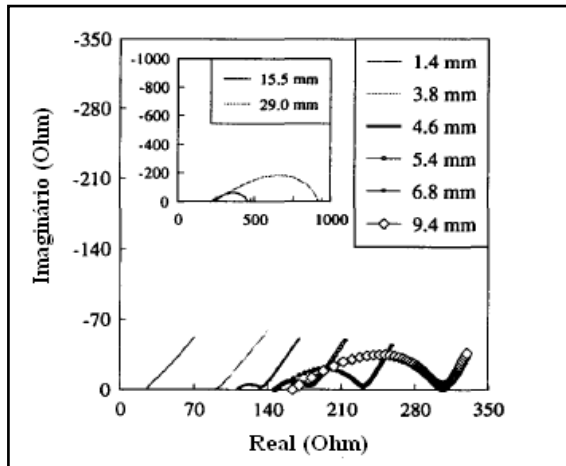
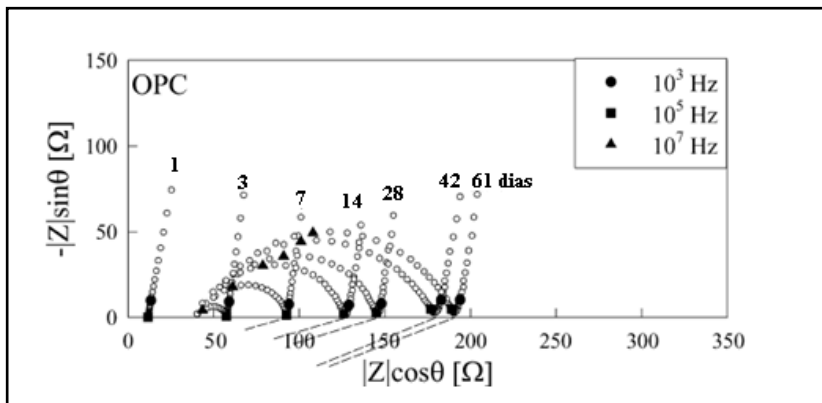


Figura 11 – Espectro de impedância de pastas de cimento com diferentes espessuras.

Fonte: Adaptado de Xie *et al.* (1994).

Kim *et al.* (2003) verificaram o aumento dos raios dos arcos de impedância, conforme aumentava o período de cura das pastas de cimento (Figura 12).



**Figura 12 - Espectro de impedância das pastas de cimento.**

Fonte: KIM *et al.* (2003).

Gu P. *et al.* (1992) calcularam as resistências elétricas (de interface sólido/eletrodo e a total da amostra) que não foram alcançadas com o desenvolvimento dos espectros de impedância elétrica. Com a evolução do tempo de hidratação das pastas de cimento, as impedâncias elétricas diminuíram, as resistências elétricas referentes à interface pasta/eletrodo ( $R_{(int)}$ ) e à total da amostra ( $R_t$ ), aumentaram. Já a capacitância resultante da interface sólido/líquido ( $C_i$ ) diminuiu com o aumento do tempo de hidratação (Tabela 2).

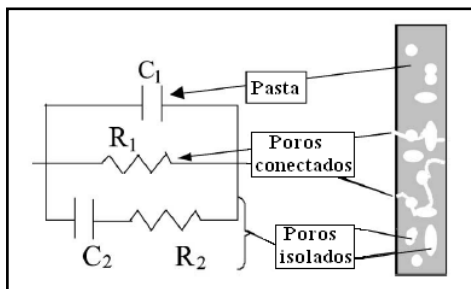
**Tabela 2 – Valores de resistência e capacitância ao longo do período de cura das pastas de cimento.**

Tempo de hidratação (h)	$R_t$ (ohms)	$R_{(int)}$ (ohms)
48	80	-
68	87	-
169	99	13,5
194	104	15,0
286	111	25,0
380	113	30,0

Fonte: Adaptado de Gu *et al.* (1992).

Os materiais cimentícios são considerados materiais dielétricos. Cabeza *et al.* (2002) verificaram a impedância elétrica em pastas de

cimento Portland com diferentes proporções de água, em relação a massa de cimento utilizada. De acordo com os resultados obtidos, o aumento da quantidade de água na pasta de cimento, aumentou a porosidade e a parcela resistiva da impedância elétrica das pastas. Ou seja, a parcela consistente e sem poros, da pasta, possui propriedade capacitiva. Já os poros conectados, ou não, são responsáveis pela propriedade resistiva, como pode ser visto resumidamente na Figura 13.



**Figura 13 – Circuito equivalente do ensaio de impedância elétrica.**

**Fonte:** Adaptado de CABEZA *et al.* (2002).

Esta relação entre as propriedades elétricas e o teor de água presente nos materiais cimentícios, é explícita nos efeitos de relaxamentos descritos por Saltas *et al.* (2007). São processos de polarização que podem ser, segundo o autor, seguindo o aumento do teor de umidade:

- (i) Polarização por orientação da água adsorvida;
- (ii) Polarização dos filmes ou “pacotes” de líquidos, que permitem a livre migração dos íons do fluido;
- (iii) Polarização nas superfícies ásperas e irregulares;
- (iv) Polarização da dupla camada (C-S-H gel) “fechada” ou “aberta”, dependendo do deslocamento limitado ou o livre intercâmbio das cargas, respectivamente, resultante do excesso de íons e de eletrólito.

A polarização ocorre após a imposição de uma corrente elétrica, onde os íons presentes são atraídos pelos eletrodos, alterando a diferença de potencial entre ambos. A polarização elétrica refere-se ao fenômeno que ocorre quando os polos positivos e negativos não coincidem. Geralmente, ocorre em materiais dielétricos, quando este é exposto a um campo elétrico. Durante as medidas de resistividade elétrica, é comum ocorrer na direção oposta à direção do campo elétrico aplicado e causa

um aumento nos valores obtidos das resistividades elétricas (CAO e CHUNG, 2004).

No entanto, a polarização é mais significativa em circuitos com corrente contínua.

Com a medida da impedância elétrica de argamassas, os resultados esperados são espectros, que segundo Saltas *et al.* (2007), é uma ferramenta poderosa na investigação de uma possível contaminação e bem adequado para o monitoramento de resíduos perigosos

### 2.3.2 Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica no sistema internacional é medida em S/m (Siemens/ metro), que equivale a  $(\Omega \cdot m)^{-1}$ . Condutividade elétrica é a capacidade de um material em conduzir a corrente elétrica.

A natureza heterogênea dos materiais cimentícios resulta em diferentes condutividades elétricas, ocorrendo uma competição entre elas. Tumidajski (1996) analisou a competição entre o agregado com condutividade elétrica menor do que a argamassa e o desenvolvimento da zona de transição entre o agregado e a pasta, de maior condutividade elétrica.

Uma vez que, os agregados apresentam menor condutividade elétrica devido a sua natureza, uma argamassa com maior fração de agregados em volume, apresentará menor condutividade elétrica. No entanto, quanto maior a quantidade de finos, maior a zona de transição pasta/agregado (regiões de grande condutividade elétrica) e maior a condutividade elétrica da argamassa.

A idade de cura de matrizes cimentícias também influencia na condutividade elétrica. Com o aumento da idade de cura das matrizes cimentícias, a quantidade de água encontrada dentro da matriz e a condutividade elétrica diminuem.

A condutividade elétrica também pode ser medida em diferentes faixas de frequência, aplicando-se um campo elétrico de corrente alternada. SALTAS *et al.* (2007) verificaram que em baixas frequências, a condutividade das rochas, contaminadas com líquido lixiviante (proveniente de um aterro sanitário e contendo metais pesados), foi melhor descrita para as amostras secas. E com o aumento do teor de contaminação, aumentou a condutividade elétrica das rochas (Figura 14).

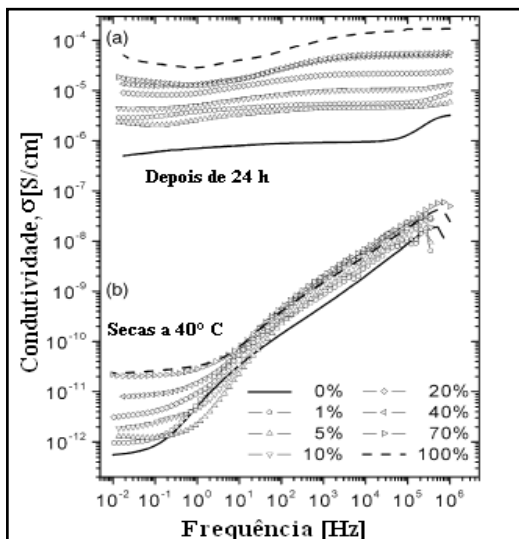


Figura 14 – Condutividade elétrica das rochas contaminadas.

Fonte: Adaptado de SALTAS *et al.* (2007).

Uma das principais conclusões da pesquisa de Saltas *et al.* (2007) foi que o método de espectroscopia, por impedância elétrica, pode ser bem adequado para o monitoramento de resíduos perigosos.

A condutividade elétrica pode ser determinada por meio da (20).

$$\sigma_{eff} = \frac{l}{RA} \quad (20)$$

Onde:

$\sigma_{eff}$  é a condutividade elétrica efetiva, em S/m, ou seja,  $(\Omega \cdot m)^{-1}$ ;

L é o comprimento da amostra, em metros;

A é a área da seção transversal da amostra, em  $m^2$ ;

R é a resistência elétrica da amostra, em  $\Omega$ .

### 2.3.3 Resistência Elétrica

Resistência elétrica é o impedimento que um material provoca, frente à passagem de uma corrente elétrica.

Segundo a Lei de Ohm ((21), a diferença de potencial elétrico dependerá da resistência imposta num circuito elétrico e da corrente elétrica.

$$V = i.R \quad (21)$$

Onde  $V$  é o potencial elétrico medido em volt ( $V$ ),  $i$  é a corrente elétrica medida em ampère ( $A$ ) e  $R$  é a resistência elétrica medida em ohm ( $\Omega$ ).

As medidas de resistência elétrica aferem umidades inferiores a 0,1 % e podem ser sensíveis à presença de sais, mesmo em baixas concentrações. Sais higroscópicos, principalmente cloretos e nitratos, mesmo em concentrações muito baixas, em condições de altos teores de umidade, favorecem a diminuição da resistividade. Quanto maior a quantidade de íons livres num determinado material, maior será a sua condutividade elétrica e menor será a sua resistência (Coleman, 1999).

### 2.3.4 Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica difere da resistência elétrica por ser uma medida elétrica independente da geometria do material.

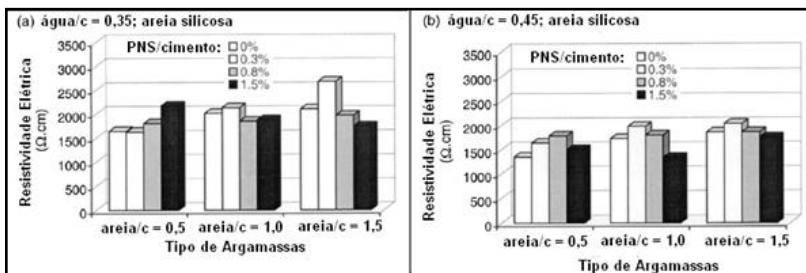
A Lei de Ohm afirma que a corrente fluindo através de um dispositivo é diretamente proporcional à diferença de potencial aplicada ao dispositivo. Porém, nem todos os condutores obedecem à Lei de Ohm, ou seja, um gráfico  $i$  ( $A$ ) x  $v$  (volt) desses dispositivos não é linear. Logo, as propriedades intrínsecas desses materiais é o que realmente importará, como por exemplo, a resistividade elétrica.

A resistividade elétrica de um material correlacionará a sua resistência ( $\Omega$ ) à passagem da corrente elétrica (gerada a partir de uma fonte estabilizada de tensão) e o seu comprimento (metros). A (22) descreve o cálculo da resistividade elétrica  $\rho$  ( $\Omega.m$ ), com o comprimento da amostra igual a  $L$  (m) e uma área da seção transversal da amostra igual a  $A$  ( $m^2$ ).

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (22)$$

A pesquisa de Xu *et al.* (2000) mostrou que a resistividade elétrica variou com a adição do aditivo superplastificante (sulfonatos polinaftalenos – PNS), como também, em função da relação água/cimento e a razão areia/cimento das argamassas (**Figura 15 – Relações entre as resistividades elétricas, fator a/c, natureza do agregado e teor de aditivo.**Figura 15).





**Figura 15 – Relações entre as resistividades elétricas, fator a/c, natureza do agregado e teor de aditivo.**

**Fonte:** Adaptado de XU *et al.*, 2000.

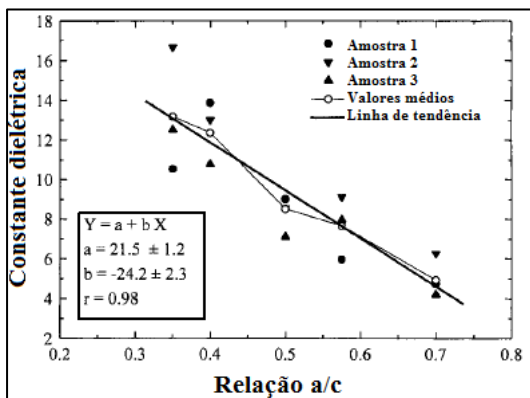
Existem duas modalidades de resistividade elétrica, uma denominada como Resistividade Elétrica Aparente e a outra como Resistividade Elétrica Volumétrica. A diferença entre ambas está no local onde são realizadas as suas medidas. A primeira, a aparente, é realizada na superfície de um corpo. A Resistividade Volumétrica refere-se à medição da resistividade no interior do corpo.

### 2.3.5 Permissividade Elétrica

A permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ), medida em Faraday/metro (F/m) é a capacidade de um material de rearranjar as suas moléculas, frente à aplicação de um campo elétrico externo. Quando o material é isolante, a disponibilidade de íons livres para este rearranjo é menor e o campo elétrico no interior do material não se anulará com a aplicação do campo elétrico.

A relação entre a permissividade de cada material e a permissividade elétrica no vácuo ( $\epsilon_0 = 8,854187 \times 10^{-12}$  F/m) é conhecida como a permissividade relativa do material ( $\epsilon_r$ ) ou constante dielétrica do material (k) que é adimensional.

Andrade *et al.* (1999) constantes dielétricas de pastas de cimento de diferentes espessuras (3 - 6 mm) produzidas com cinco relações a/c (Figura 16). Com o aumento da relação a/c diminuiu a constante dielétrica das pastas de cimento.



**Figura 16 – Constante dielétrica de pastas de cimento com diferentes relações a/c.**

**Fonte:** Adaptado de Andrade *et al.* (1999).

## 2.4 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA LIBERAÇÃO DOS METAIS PESADOS DAS MATRIZES CIMENTÍCIAS E NAS MEDIDAS ELÉTRICAS

### 2.4.1 Porosidade

A porosidade aberta de um corpo sólido compreende num sistema de espaços vazios, chamados de poros que estão conectados entre si. A porosidade corresponde ao máximo de fluido cabível em um meio poroso, dada pela razão entre o volume de vazios (volume de poros) e o volume total da amostra. Este volume de vazios também pode ser determinado como índice de vazios.

O tamanho dos poros determina o potencial de retenção de água e, conseqüentemente, a sucção necessária para saturar ou secar um material. Quanto maior é a dimensão do poro, menor será a sua sucção.

A porosidade é uma característica física dos materiais, que principalmente, para os cimentícios, revela os seus potenciais de durabilidade. Os poros permitem a entrada de água ou agentes agressivos em pastas de cimento, argamassas, concretos ou estruturas de concreto armado. Portanto, no desenvolvimento de novas tecnologias e materiais na construção civil, faz-se o estudo da porosidade.

Dentre algumas técnicas utilizadas para a medição da porosidade está a simples imersão dos materiais em água.

Outra técnica de porosimetria consiste na intrusão de mercúrio num sólido poroso. Uma pressão é aplicada, para o preenchimento de

grande parte dos poros e espaços vazios existentes, com mercúrio. As pressões aplicadas são convertidas em diâmetros dos poros por meio da lei de Laplace, descrita na (23).

$$d[\mu m] = \frac{1,5}{P_{Hg} [MPa]} \quad (23)$$

No entanto, com esta técnica, muitos poros não são preenchidos com o mercúrio, devido à limitação da pressão aplicada, pela infinidade de poros não interligados e de diâmetros infinitamente pequenos.

Os materiais produzidos com a adição de resíduos contaminados, perante algumas condições, podem liberar seus contaminantes para o ambiente. A porosidade e a permeabilidade desses materiais serão um dos fatores que facilitarão ou dificultarão essa mobilidade de substâncias tóxicas.

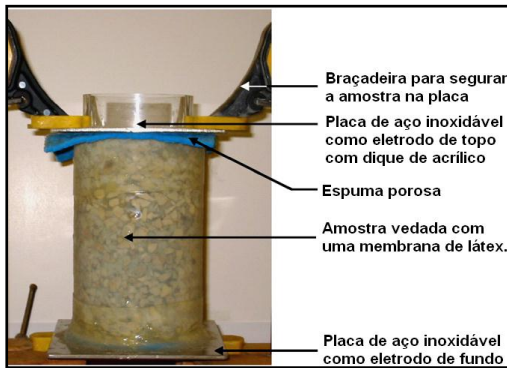
Burlion *et al.* (2006) constataram que a cinética de lixiviação é relacionada às propriedades de transferências dos materiais: quanto menor a porosidade e o grau de conectividade entre os poros, menor será a penetração da solução agressiva e menor a mobilidade dos contaminantes.

Gineys *et al.* (2010) verificaram uma diminuição da porosidade e dos diâmetros dos poros de pastas de cimento contaminadas com metais pesados Cd, Ni, Pb, Cu e Zn, por meio da porosimetria por intrusão do mercúrio.

Quanto maior a porosidade de uma argamassa, menor será a sua condutividade elétrica, pois o ar que preenche os poros, não conduz a corrente elétrica. No entanto, uma vez saturada com água, esta argamassa terá grande capacidade de conduzir a corrente elétrica e apresentará menor resistência elétrica.

A porosidade é uma das propriedades física dos materiais cimentícios que influencia na tortuosidade dos mesmos.

Os concretos porosos desenvolvidos por Neithalath *et al.* (2006) foram avaliados a partir da espectroscopia de impedância elétrica, para a posterior determinação das resistências elétricas dos concretos (Figura 17).



**Figura 17 – Ensaio de Espectroscopia de Impedância Elétrica (EIE)**

Fonte: NEITHALATH *et al.* (2006).

Os resultados obtidos neste estudo mostraram que quanto maior era a fração de agregados graúdos nos concretos, menor era a condutividade elétrica, maior o fator de conectividade hidráulica (maior a possibilidade de fluxo de um fluido dentro do corpo de prova) e maior a porosidade dos concretos.

Enfim, o tamanho dos poros, a conectividade entre eles e a tortuosidade são propriedades do meio poroso.

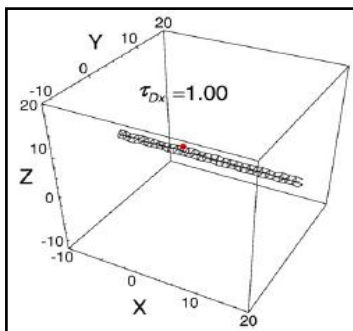
#### 2.4.2 Tortuosidade

Brown (1980) estudou algumas relações de mobilidade entre sólido-líquido por meio da relação entre a condutividade elétrica e a propagação de ondas acústicas. O autor verificou que através de uma diferença de potencial elétrico, aplicada nas extremidades de uma amostra sólida, satisfazendo a equação de Laplace, era possível conhecer o potencial de movimentação do fluido que a preenche. Brown (1980) foi um dos cientistas pioneiros na determinação da tortuosidade existente num material sólido poroso.

A tortuosidade é uma das propriedades intrínsecas do meio poroso, de uma amostra sólida, juntamente com a distribuição, conexão e tamanho dos poros. Uma definição clássica da tortuosidade ( $\tau$ ) é dada como a razão entre a distância média efetiva ( $L_e$ ), percorrida por um fluido ou partícula elétrica, dentro de um corpo poroso, e a menor distância possível de ser percorrida ( $L$ ) pelo fluido ((24).

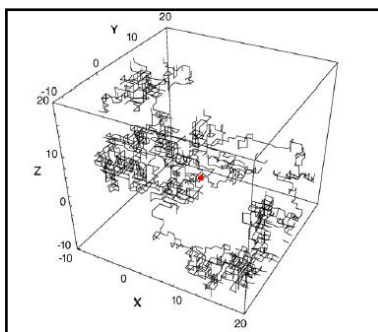
$$\tau = \frac{L_e}{L} \quad (24)$$

Portanto, a tortuosidade será sempre maior ou igual a um. A Figura 18 representa o caminho percorrido por um fluido, num sistema unidimensional (eixo x) onde a tortuosidade é igual a 1,00 (PROMENTILLA *et al.*, 2009).



**Figura 18 – Sólido poroso e cúbico, apresentando tortuosidade igual a um.**  
Fonte: PROMENTILLA *et al.* (2009).

No entanto, esta definição está intimamente relacionada às propriedades de transporte de umidade, como a permeabilidade e a difusão, num sistema unidimensional. Na verdade, o transporte de umidade dentro de um meio poroso não se dá apenas numa direção. Para o estudo da tortuosidade em três dimensões (3D), estudos internacionais utilizaram microtomografias. Na pesquisa de Promentilla *et al.* (2009), a microtomografia foi uma técnica não invasiva, utilizada para a simulação computacional, do sistema de poros de um sólido (Figura 19).



**Figura 19 – Simulação do sistema de poros em 3D.**  
Fonte: PROMENTILLA *et al.* (2009).

Ainda no estudo de Promentilla *et al.* (2009), foi salientado que a tortuosidade difusiva é relacionada à razão entre: o coeficiente de difusão, das partículas que se movimentam dentro dos espaços livres do meio ( $D_0$ ) e o coeficiente de difusão das partículas ou do fluido, que se movimentam através dos espaços dos poros ( $D_\infty$ ). Ambos os coeficientes são medidos em função do tempo. O coeficiente de difusão das moléculas, através dos espaços livres de um meio, é independente do tempo. No entanto, passa a variar com o tempo, quando é medido num espaço confinado. Nos espaços de poros confinados, por exemplo, o coeficiente de difusão se aproxima de zero, mas, aproxima-se de um valor diferente de zero, na difusão das moléculas através da distribuição dos poros abertos, comprovando a conectividade e a tortuosidade entre eles. E a relação entre ambas as difusões, é a relação de tortuosidade. Nos espaços dos poros, a difusão é dificultada e tende a ser menor. Essa proporção de diminuição da difusão, determinada pela tortuosidade, também é decorrente da porosidade ( $\Phi$ ) e um fator de formação ( $F$ ) ((25). Este fator é a razão existente entre a resistividade elétrica do corpo, no estado úmido e a resistividade do líquido que o atravessa.

$$\frac{D_0}{D_\infty} = \tau = F \cdot \phi \quad (25)$$

Onde:

$\tau$  = tortuosidade, adimensional;

F = fator de formação, constante de proporcionalidade;

$\Phi$  = porosidade do material poroso, em %.

Tumidajski *et al.* (2005) relacionam o fator de formação à difusividade e à resistividade de uma forma mais simples, apresentado na (26).

$$F = \frac{\rho_{\text{arg amassa}}}{\rho_{\text{água dos pores}}} = \frac{D_{\text{água dos pores}}}{D_{\text{arg amassa}}} \quad (26)$$

Quanto menor a difusividade de uma argamassa, maior será a sua resistividade elétrica.

O fator de formação, F, também é a relação entre a condutividade elétrica dos eletrólitos presente no fluido ( $\sigma_f$ ) e a condutividade dos eletrólitos presentes no meio poroso ( $\sigma_e$ ). Com a relação de Nernst-Einstein, o inverso do fator de formação é equivalente a difusibilidade

ou difusividade relativa ( $D_e/D_f$ ) do meio poroso.  $D_e$  é a difusão efetiva ou intrínseca do meio poroso, ou seja, o fluxo médio por unidade de área do meio poroso, usando a Lei de Fick.  $D_f$  é o coeficiente de difusão da fase livre do fluido, como é mostrado na (27).

$$\frac{\phi}{\tau} = \frac{1}{F} = \frac{\sigma_e}{\sigma_f} = \frac{D_e}{D_f} \quad (27)$$

No estudo de Tumidajski *et al.* (2005), o fator de formação,  $F$ , relaciona a porosidade com a tortuosidade e a constrictividade dos poros ((28).

$$F = \mu\phi^m \quad (28)$$

Onde:

$\mu$  = é definido como  $\tau^2/k$ , sendo que  $\tau$  é a tortuosidade e  $k$  é a constrictividade dos poros;

$\phi$  = é a porosidade;

$m$  = é uma constante;

Interpretando (28, verificou-se que o fator de formação é diretamente proporcional à razão entre a tortuosidade e a constrictividade dos poros e dependerá da porosidade do sólido. O efeito de constrictividade refere-se à diminuição gradual do diâmetro dos poros, dificultando o transporte dos fluidos.

Para tanto, a difusão também é um parâmetro importante no estudo da estrutura sólida de uma matriz cimentícia e pode ser relacionada às propriedades elétricas.

### 2.4.3 Difusividade

A difusão é o principal mecanismo de transporte de umidade na fase vapor e de mobilidade dos íons das partículas sólidas para um meio líquido, de acordo com a diferença de potencial químico entre ambos. No primeiro tipo, a umidade presente no ambiente externo, como vapor, é fixada na superfície do material poroso por adsorção física (mecanismo regido pelas forças de Van der Waals) e é transportado para o interior, principalmente, por difusão e evaporação. No segundo tipo, a unidade de medida da difusão é  $m^2/s$  (metro quadrado por segundo), ou seja, sua determinação é realizada por meio de características intrínsecas do corpo de prova, como área superficial e volume, e do intervalo de

tempo em que acontece a liberação de íons de um meio mais concentrado, para o menos concentrado.

O termo difusão é dado ao transporte natural de partículas fluidas, descritas pelas Leis de Fick. O coeficiente efetivo da difusão, expressa a combinação do transporte de umidade das fases líquida e vapor. A fase líquida preenche o espaço dos poros capilares dos materiais e a fase gasosa é adsorvida nas paredes dos poros (GARBALINSKA *et al.* 2010).

Para um sistema unidimensional, matematicamente se expressa a lei de Fick segundo a (29).

$$j_A = -D_A \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad (29)$$

Onde:  $j_A$  é a quantidade de substância A, que atravessa uma unidade de área, por unidade de tempo e uma vez existindo diferença de concentração de uma substância entre dois meios, separados por uma distância  $\Delta x$ ,  $D_A$  é o coeficiente de difusão (constante de proporcionalidade, que mede o quão facilmente uma substância A se move em um determinado meio). O sinal negativo, simplesmente indica que a movimentação das partículas tende ao decréscimo da concentração, ou seja, o fluxo é positivo, quando o gradiente de concentração é negativo. O termo  $j_A$  refere-se ao fluxo da água que, durante a absorção, movimenta-se por difusão dentro de uma matriz sólida, desde que haja um gradiente de umidade.

Garbalinska *et al.* (2010) estudaram a transferência de umidade entre um material sólido poroso e a atmosfera. A transferência de umidade dentro do próprio material, consiste em três estágios: a adsorção/desorção na interface sólido/gás; a difusão da umidade dentro dos poros; e a troca convectiva do vapor entre os poros do material e a atmosfera. A difusão varia com o tempo mesmo se as condições do ambiente são estáveis, ou seja, controladas. A taxa de difusão muda de acordo com o conteúdo de umidade do material, uma vez que haja diferença no teor de umidade do material e do ambiente que o circunda.

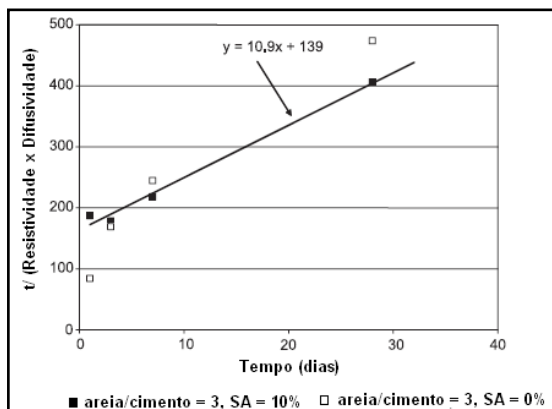
Goual *et al.* (2006) verificaram que o aumento gradual da umidade relativa do ar induz a absorção de água do ambiente pelo material poroso, por meios dos processos de adsorção e condensação capilar. No processo de adsorção, há dois estágios de fixação da água na matriz cimentícia. O primeiro estágio é a adsorção monomolecular, quando uma única camada de moléculas de água cobre a superfície dos poros; no segundo estágio, há a fixação sucessiva de várias camadas de moléculas de água. Quando a umidade relativa no ar é alta, as



multicamadas de água adsorvidas nas paredes dos poros formam pontes líquidas entre os poros, características da fase de condensação capilar.

Como a difusão implica nos mecanismos de transporte de umidade, nos materiais de construção é possível correlacioná-la à resistividade elétrica, uma vez que a presença de água nos corpos sólidos altera suas resistividades elétricas.

De acordo com Tumidajski *et al.* (2005), a partir do momento que aumenta a idade de cura das argamassas, as resistividades elétricas aumentam e as difusividades das amostras diminuem. Ou seja, a difusividade também pode ser relacionada com a resistividade elétrica e o produto desses dois fatores, em relação ao tempo, resulta num gráfico linear (Figura 20).



**Figura 20 - Relação Linear do produto entre a resistividade elétrica e a difusividade**

**Fonte:** Adaptado de TUMIDAJSKI P. J. (2005).

Tumidajski (2005) analisou argamassas quanto à resistividade elétrica, difusividade, porosidade e diâmetro dos poros. A resistividade elétrica foi medida a partir da espectroscopia de impedância elétrica. As difusividades foram mensuradas por meio da imersão dos corpos de prova no propanol-2 anidro. O líquido foi renovado após 1, 2, 4, 8 e 24 h. Em seguida, a renovação era feita a cada 24 horas e, depois em intervalos de sete dias. Os resultados obtidos demonstraram que as porosidades das argamassas diminuíram com o aumento da idade de cura, a resistividade elétrica aumentou, a difusividade diminuiu e o diâmetro médio dos poros das argamassas diminuiu.

#### **2.4.4 Absorção:**

A absorção capilar é o transporte de líquidos devido à tensão superficial atuante nos poros capilares.

A absorção influencia e auxilia no entendimento do comportamento de argamassas, referente ao transporte de água, que pode ocorrer por capilaridade. A absorção é um processo físico que ocorre em materiais não saturados. Ela é importante porque é neste processo que ocorre a entrada da água e de outras substâncias agressivas em estruturas cimentícias.

A água influencia no desenvolvimento da estrutura sólida, nas propriedades mecânicas dos materiais de construção e também pode ser um veículo transportador dos metais pesados, alterando as suas mobilidades dentro das matrizes cimentícias.

A absorção e a tortuosidade refletem características do sólido poroso. E são as características desta estrutura que definirão uma maior ou menor liberação dos metais pesados das matrizes cimentícias.

A absorção depende das características do líquido (viscosidade, densidade e tensão superficial) e do sólido poroso (raio dos poros, tortuosidade e continuidade dos poros, energia superficial, conteúdo de umidade).

Quanto maior a viscosidade do líquido, menor a absorção capilar. Quanto maior a tortuosidade do sólido, menor a absorção; quanto menor os raios dos poros, maior a tensão superficial e maior a absorção. Todos estes fatores se correlacionam e agem simultaneamente no meio poroso. Surgem, então, os conceitos de capilaridade, sorptividade e coeficiente de capilaridade, descritos nos próximos itens.

##### **2.4.4.1 Capilaridade:**

A água, em seu estado líquido, fixa-se nos poros pelo fenômeno da capilaridade. Se o meio é insaturado, o transporte da água ocorre devido ao potencial de sucção do material e a água sobe acima da superfície livre, pelos interstícios capilares. A capilaridade é decorrente da pressão capilar, uma tendência dos líquidos de subir pelas paredes de tubos capilares (tubos muito finos). Esta tendência é uma consequência da tensão superficial do líquido e depende, dentre outros fatores: do raio deste tubo e da densidade absoluta e viscosidade do líquido.

Nos poros maiores que os capilares, o transporte da água é regido pelas leis da hidráulica. Na saturação, a sucção é nula e o transporte da água ocorre quando é estabelecido um gradiente de pressões.

Para compreender um pouco melhor o que são os coeficientes de capilaridade e a sorptividade, decorrentes do ensaio de absorção por capilaridade, segue a explanação no próximo item.

#### 2.4.4.2 Sorptividade e Coeficiente de Capilaridade

Sorptividade ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$ ) é a inclinação da reta de um gráfico  $\sqrt{t}$  x  $i$ , onde  $t$  é o tempo que a água leva para ser absorvida (s) e  $i$  é o volume de água absorvida por área de secção do corpo de prova ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ), parâmetros abordados na (30).

$$i = S \times \sqrt{t} \quad (30)$$

Outro parâmetro também obtido do ensaio de absorção por capilaridade, demonstrado na (31), é o coeficiente de capilaridade,  $k$ . Este coeficiente fornece a profundidade de penetração do líquido e é determinado por:

$$Z = k \times \sqrt{t} \quad (31)$$

Onde  $Z$ , refere-se à altura da mancha, que o líquido absorvido provocará na amostra.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental da presente pesquisa consistiu na realização das seguintes etapas metodológicas:

a) Etapa 1: Confeção das argamassas utilizando-se o traço (proporcionamento unitário) de 1:2 (cimento: areia), em massa, e relação a/c (água/cimento) igual a 0,50. Afim de se obter argamassas com diferentes porosidades foram também produzidas argamassas de referência (REF) produzidas em três relações a/c: 0,40, 0,50 e 0,60 (denominadas de REF 0,4, REF 0,5 e REF 06). Nas demais argamassas, a série denominada contaminada, foram adicionados os metais pesados cromo, cádmio, chumbo e zinco nas proporções de 20, 40, 80 e 160 ppm.

b) Etapa 2: Medição da impedância elétrica em função da idade de cura para avaliar possíveis alterações microestruturais devido ao processo de hidratação das matrizes cimentícias, em função da concentração dos metais pesados e da relação a/c.

c) Etapa 3: Medição da impedância elétrica das argamassas durante o ensaio de tanque, ao longo do processo de lixiviação dos contaminantes. Esta etapa teve por finalidade avaliar o processo de lixiviação dos metais pesados das matrizes cimentícias por meio da medida elétrica e do ensaio de lixiviação. Para tanto, foi acompanhada a liberação dos contaminantes ao longo do tempo, por meio da análise química dos líquidos lixiviantes e a influência da variação na concentração dos metais pesados por meio da medida da impedância elétrica. Dessa forma procurou-se identificar a concentração dos metais pesados que não foi liberada e que permaneceu fixada na matriz do material monolítico. Como a liberação dos elementos químicos pode ser relacionada com a difusividade e a impedância elétrica, esta etapa proporcionará a compreensão da relação existente entre a difusividade e a impedância elétrica.

d) Etapa 4: Medição da impedância elétrica no estado parcialmente saturado por meio do ensaio de absorção capilar. O objetivo desta etapa foi de avaliar a influência da presença da água nas medidas de impedância elétrica das argamassas e obter as resistividades

elétricas das argamassas no estado úmido, sem que ocorresse a liberação dos metais durante o processo de saturação.

O fluxograma da Figura 21 resume estas principais etapas que nortearam a presente pesquisa, como também os ensaios utilizados para cada etapa metodológica.

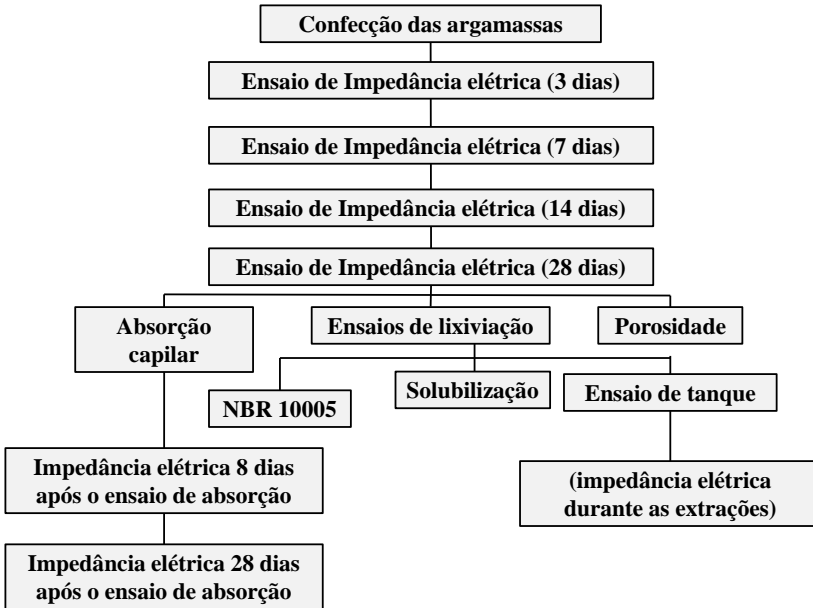


Figura 21 – Fluxograma das etapas metodológicas.

### 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Foram produzidas argamassas com uso do Portland CPV – ARI de marca Holcim. As argamassas foram produzidas na composição, em massa, de (1:2) cimento e areia e relação a relação água e cimento (a/c) igual a 0,50. Este traço foi escolhido para que não houvesse tanta influência da porosidade das argamassas nas medidas elétricas. As argamassas foram contaminadas com os metais pesados: cromo, chumbo, zinco e cádmio, com as concentrações, em relação à massa de cimento, de: 20, 40, 80 e 160 ppm, empregando sais à base de nitrato padrão analítico (P.A.). Os teores de contaminação foram assim predeterminados, por não haver liberações dos metais pesados, de matrizes cimentícias, em proporções maiores do que 400 ppm, quando

são provenientes de resíduos incorporados às matrizes cimentícias (SHAEFFER C. O., 2007; MESQUITA L. P., 2008). Além das argamassas produzidas com relação a/c igual a 0,50, foram confeccionadas outras duas argamassas de referência de relação a/c 0,40 e 0,60, as quais não foram contaminadas. Assim, dentre as argamassas de referência poderá ser verificada a influência da porosidade nas medidas de impedância elétrica.

### 3.2.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CPV – ARI de marca Holcim. A composição química encontra-se Tabela 3 abaixo:

**Tabela 3 - Características do cimento CP V\_ ARI.**

<b>Ensaio Químicos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Média</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	5,10
SiO <sub>2</sub>	%	19,36
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,02
CaO	%	63,71
MgO	%	0,76
SO <sub>3</sub>	%	2,84
Na <sub>2</sub> O	%	0,16
K <sub>2</sub> O	%	0,83
Perda ao fogo	%	3,80
Resíduo insolúvel	%	0,73
CO <sub>2</sub>	%	2,60
<b>Ensaio Físicos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Média</b>
Expansão a quente	mm	0,00
Início de pega	min	120
Fim de pega	min	180
Água de Consistência normal	%	31,0
Blaine	cm <sup>2</sup> /g	3466
Peneira 200	%	0,0
Peneira 400	%	1,8
Resistência à compressão - 1 dia	MPa	28,9
Resistência à compressão - 3 dias	MPa	41,5
Resistência à compressão - 7 dias	MPa	45,9
Resistência à compressão - 28 dias	MPa	54,1

### 3.2.2 Metais Pesados

Para a contaminação das argamassas, foram escolhidos os metais pesados, cromo, chumbo, zinco e cádmio. As fórmulas químicas dos nitratos, a partir dos quais foi realizada a contaminação das argamassas são apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4 - Fórmulas químicas dos nitratos utilizados para a contaminação**

<b>Metal Pesado</b>	<b>Fórmula molecular</b>
Cd	$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Cr III	$\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$
Pb	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$
Zn	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

### 3.3 MÉTODOS

As amostras foram denominadas segundo a Tabela 5.

**Tabela 5 - Denominação das amostras.**

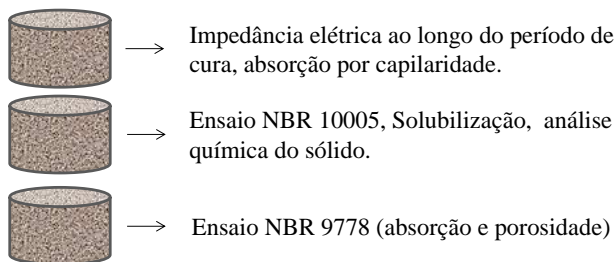
<b>REF 0,40</b> <b>REF 0,50</b> <b>REF 0,60</b>	Amostra de referência, sem contaminação, com três relações a/c.
<b>Cr 20</b> <b>Pb 20</b> <b>Cd 20</b> <b>Zn 20</b>	Contaminação de 20 ppm de metal pesado, em relação a massa de cimento, utilizada para a produção da argamassa.
<b>Cr 40</b> <b>Pb 40</b> <b>Cd 40</b> <b>Zn 40</b>	Contaminação de 40 ppm de metal pesado, em relação a massa de cimento, utilizada para a produção da argamassa.
<b>Cr 80</b> <b>Pb 80</b> <b>Cd 80</b> <b>Zn 80</b>	Contaminação de 80 ppm de metal pesado, em relação a massa de cimento, utilizada para a produção da argamassa.
<b>Cr 160</b> <b>Pb 160</b> <b>Cd 160</b> <b>Zn 160</b>	Contaminação de 160 ppm de metal pesado, em relação a massa de cimento, utilizada para a produção da argamassa.

Os corpos de prova moldados são cilíndricos, com 5,00 cm de diâmetro e 10,00 cm de altura. A moldagem dos corpos de prova se deu



em três camadas, cujas massas de cada camada foram medidas, para que as densidades das argamassas permanecessem constantes.

Dois corpos de prova foram moldados para cada tipo de amostra apresentada na Tabela 5. Um corpo de prova foi submetido ao ensaio de tanque com 28 dias de cura. O outro corpo de prova foi seccionado transversalmente em três partes (Figura 22).



**Figura 22 - Seccionamento das argamassas.**

A parte central do corpo de prova foi reduzida em partículas menores que 9,5 mm para o ensaio de lixiviação (NBR 10005), análise química do sólido e ao ensaio de solubilização (NBR 10006). A parte superior foi submetida aos ensaios: de impedância ao longo da idade de cura, absorção capilar e novamente ao ensaio de impedância elétrica. A parte inferior foi armazenada em ambiente com temperatura e umidade relativa do ar controladas, devidamente vedada para evitar perdas de umidade e submetida ao ensaio descrito pela NBR 9778 para determinação da absorção e do índice de vazios.

Os ensaios de solubilização, o ensaio descrito pela NBR 10005 e a análise química do sólido foram utilizados para a determinação da máxima concentração disponível para ser lixiviada, de cada elemento químico. Com este valor foi possível determinar a difusividade desses elementos.

### 3.3.1 Índice de vazios

Para este ensaio foi utilizada a norma brasileira NBR 9778 (2005). Neste procedimento as argamassas foram secas em estufa a uma temperatura de  $(105 \pm 5)^\circ \text{C}$  por um período de 72 horas. Depois as amostras foram imersas em água (temperatura ambiente) durante 72 horas e depois de completada a saturação, as amostras foram depositadas em recipiente com água que entrou em ebulição

progressivamente e permaneceu em ebulição durante 5 horas. Depois do banho térmico as amostras esfriaram naturalmente até a temperatura ambiente e se registrou as massas das argamassas com o auxílio de uma balança hidrostática.

Para a determinação da porosidade ou o índice de vazios das argamassas, utilizou-se a (32).

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (32)$$

Onde  $m_{sat}$  é a massa das amostras após 72 horas de imersão em água;  $m_s$  é a massa seca da amostra (após 72 horas na estufa) e  $m_i$  é a massa da argamassa registrada com o auxílio da balança hidrostática. Todas as massas foram medidas em gramas.

A determinação do índice de vazios auxiliou na determinação da tortuosidade das amostras.

### 3.3.2 Análise química das argamassas contaminadas

Com a análise química das argamassas foi possível verificar a quantidade de metais pesados presentes nestas amostras antes da submissão destas ao ensaio de lixiviação.

Para a realização dos ensaios de análise química foi empregado o espectrômetro utilizado é o EDX-700, da marca Shimadzu. Este modelo permite a análise de elementos entre o sódio e o urânio (Na e U).

A técnica foi usada nas determinações da composição química: das argamassas (monolítica e em pó) e nos frações líquidas obtidas nos ensaios de lixiviação.

Uma vez conhecida a composição química das argamassas, aos 28 dias de cura, elas foram submetidas a dois ensaios de lixiviação que são descritos nas seções seguintes.

### 3.3.3 Impedância Elétrica

Para avaliar o desenvolvimento do próprio processo de hidratação das amostras e a possível influência dos metais pesados no processo de hidratação das argamassas, foi realizado o ensaio de medida da impedância elétrica, ao longo de 3, 7, 14 e 28 dias de cura. As medidas foram conduzidas nas amostras de argamassa de referência REF, com as diferentes relações água e cimento REF 0,40, REF 0,50 e REF 0,60; e

nas amostras com contaminação dos metais Cr, Pb, Cd Zn nas concentrações de 20,40, 80 e 160 ppm tendo relação a/c de 0,5.

Para a realização do ensaio, uma corrente alternada foi imposta, na faixa de frequência de 200 kHz até 2 MHz. A frequência de 200 kHz é o limite no qual a ponteira que lê a corrente elétrica, tem boa precisão. A frequência de 2 MHz é o valor máximo obtido com o gerador de tensão utilizado. Normalmente, a resistência elétrica das matrizes cimentícias é muito alta, resultando numa corrente elétrica muito baixa. Mesmo que a ponteira de corrente utilizada seja a mais adequada para correntes pequenas (mA), esta corrente elétrica resultante do circuito não era detectada pela ponteira de corrente. Para tanto, como a ponteira mede a corrente que passa pelo fio de cobre, este fio foi enrolado 11 vezes para que a ponteira medisse uma corrente elétrica 11 vezes maior. Assim, a ponteira de corrente conseguiu detectar uma corrente elétrica na escala de mA e o valor final obtido foi dividido por 11.

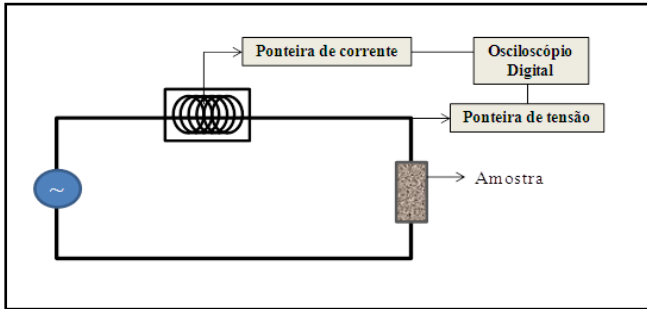
A corrente elétrica foi medida através da ponteira de corrente, que transforma a tensão do circuito, em milivolts (mV), para um valor de corrente elétrica, em miliampéres (mA). Assim, a impedância elétrica foi obtida por meio da (6, apresentada anteriormente).

As ponteiras de corrente e de tensão foram conectadas a um osciloscópio digital, que apresenta duas senóides, uma correspondente à corrente do circuito e outra, relacionada à tensão aplicada (Figura 23). Com a corrente e a tensão foi possível obter a impedância elétrica da amostra num intervalo de tempo. O osciloscópio e a ponteira para medir a corrente são da marca Tektronik. O gerador de corrente alternada é da marca Minipa, modelo MFG - 4201A (frequência máxima de 2 MHz).



**Figura 23 – Gerador de tensão para corrente alternada, osciloscópio e a argamassa.**

O esquema do circuito utilizado para a medição da impedância elétrica é mostrado na Figura 24.



**Figura 24 - Circuito elétrico utilizado para a medição da impedância elétrica.**

Com o tempo e o ângulo de defasagem entre as duas senóides, obtidos através do osciloscópio, foi possível calcular a parcela resistiva e capacitiva da impedância elétrica, ou seja, a resistência elétrica e a reatância da amostra. Ambas as parcelas, podem ser calculadas pela (10) e pela (11, já apresentadas anteriormente).

Uma vez calculada a resistência elétrica da amostra (a partir da impedância elétrica), utilizando as dimensões dos corpos de prova, calculou-se a resistividade elétrica da argamassa, utilizando a (22).

Outras propriedades elétricas também foram analisadas: a capacitância da amostra ( $C$ ) medida em faraday [F], a partir da qual se obtém a permissividade elétrica ( $\varepsilon$ ) medida em faraday por metro [F/m]. As equações para o cálculo da capacitância e da permissividade estão apresentadas na (33 (CABEZA *et al.*, 2006) e (34).

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot Z} \quad (33)$$

$$\varepsilon = \frac{Cd}{A} \quad (34)$$

Onde,  $f$  é a frequência [Hz];  $Z$  é a impedância elétrica [ $\Omega$ ];  $d$  é a distância entre os eletrodos [m]; e  $A$  é a área dos eletrodos em contato com a amostra [ $m^2$ ].

Inicialmente, a permissividade elétrica de cada argamassa foi analisada ao longo do processo de hidratação. Posteriormente, em cada idade de cura, as permissividades elétricas foram analisadas entre as amostras contaminadas e as argamassas de referência.

### 3.3.4 Ensaio de lixiviação da NBR 10005

O potencial de lixiviação dos metais pesados adicionados às argamassas foi aferido por meio do ensaio descrito pela NBR 10005, muito semelhante ao TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*), abordado na revisão bibliográfica. Neste ensaio, foram utilizadas partículas granulares de diâmetro inferior a 9,5 mm. Este experimento caracteriza a quantidade máxima liberada dos contaminantes presentes nas matrizes cimentícias disponível para a lixiviação.

A primeira etapa deste ensaio foi a identificação da solução de extração a ser empregada. Para isto, pesou-se 5g da amostra e adicionou-se 96,5 ml de água deionizada, essa mistura foi agitada durante 5 minutos e em seguida o pH foi medido. Se:

- o pH resultante for menor ou igual a 5 utiliza-se a solução de extração nº 1, em que se coloca 5,7 ml de ácido acético glacial ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) em água deionizada e adiciona-se 64,3 mL de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) na concentração de 1N; completa-se o volume para 1L (um litro), sendo que o pH desta solução deve ser  $4,93 \pm 0,05$ .

- o pH resultante for maior do que 5, adiciona-se 3,5 mL de ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ) na concentração de 1 N; a solução é homogeneizada e aquecida por 10 minutos à temperatura de  $50^\circ\text{C}$ ; medindo-se novamente o pH e se este ainda se apresentar maior do que 5, prepara-se a solução de extração nº 2, que em água deionizada, adiciona-se 5,7 mL de ácido acético glacial e completa-se o volume para 1L; o pH desta solução deve ser  $2,88 \pm 0,05$ .

A razão líquido/sólido (L/S) utilizada neste ensaio é de 20:1. Após a preparação da solução de extração, foram colocados 25g de amostra, com dimensões inferiores a 9,5 mm, juntamente com a solução de extração, dentro de um cilindro. O cilindro foi preso num dispositivo rotativo que é programado para ficar girando e movimentando a amostra durante 18 (dezoito) horas e com 30 rpm de frequência.

Ao término do ensaio, a solução de extração foi filtrada em papel analítico, sendo medido no extrato filtrado: o pH, a condutividade e realizada a análise química semiquantitativa no espectrômetro de fluorescência de raios-X (EDX), de marca Shimadzu. Para as medidas de pH e condutividade utilizou-se um volume 4 ml para as amostras usadas na leitura do EDX. Para tanto, as amostras do EDX foram colocadas em recipientes de polipropileno e— condicionads com um filme myllar de alta pureza, para serem analisadas quimicamente.

### 3.3.5 Ensaio de Solubilização

Na solubilização, tem-se por objetivo avaliar as quantidades de metais pesados possíveis de serem solubilizadas de um material sólido particulado (dimensões inferiores a 9,5 mm), utilizando apenas a água como solução de extração.

Para este ensaio, tem-se como fundamento a NBR 10006 (2004).

No início do ensaio a amostra é agitada na água e depois o conjunto ficou em repouso durante sete dias. Depois de sete dias em repouso, as soluções foram filtradas e posteriormente analisadas por espectrometria por dispersão de raios-X.

### 3.3.6 Ensaio de Tanque (*Tank Test*)

Para o estudo da difusividade ao longo do tempo, foi utilizado o ensaio de lixiviação em tanques (*Tank Test*), descrito pela norma holandesa EA NEN 7375. Trata-se de um ensaio estático que permite avaliar em amostras monolíticas, o processo de lixiviação e a quantidade de contaminantes liberados ao longo do tempo e especificamente em oito períodos distintos. Assim, pode ser feita uma estimativa das difusividades, relacionadas à mobilidade dos contaminantes presentes em argamassas. Neste ensaio, as amostras permaneceram durante 64 dias em tanques, contendo água deionizada e desmineralizada (Figura 25).



**Figura 25 - Amostras monolíticas dentro dos tanques.**

Após o primeiro contato do corpo de prova com a água, sucederam-se oito extrações do líquido e a sua renovação para análise de pH, condutividade e identificação dos elementos que sofreram lixiviação.

As extrações acontecem após as primeiras 6 horas (seis horas) de imersão dos corpos de prova e seguem após os períodos de 24h, 54h e 4, 9, 16, 36 e 64 dias. Os intervalos de tempo são crescentes e a renovação do líquido nos tanques garante um gradiente de concentração de íons entre a matriz sólida e o líquido, para que ocorra a difusão dos íons. Após a retirada do líquido dos tanques, todo ele é filtrado, passando-se num filtro de padrão analítico, sem cinzas, com auxílio de uma bomba a vácuo.

De acordo com a NEN 7375 o coeficiente de difusão é calculado por meio da (35).

$$De = \left( \frac{\varepsilon_{64}}{2653 \times \rho \times U_{\text{máx}}} \right)^2 \times f \quad (35)$$

Onde,  $\varepsilon_{64}$  é a liberação do elemento químico após os 64 dias de ensaio, em mg/m<sup>2</sup>;  $\rho$  é a densidade das argamassas em kg/m<sup>3</sup>;  $U_{\text{máx}}$  é a máxima concentração do elemento químico que pode ser lixiviada das argamassas, em mg/kg; e  $f$  é um fator de conversão igual a 1 s<sup>-1</sup>.

Para o valor de  $U_{\text{máx}}$  foram realizadas algumas considerações no cálculo do coeficiente de difusão (Equação (35)). Primeiramente, foi obtido o coeficiente de difusão considerando  $U_{\text{máx}}$  como a soma de todas as concentrações dos elementos, liberados ao longo dos 64 dias durante o ensaio de tanque. Posteriormente, foi considerado como  $U_{\text{máx}}$ : a concentração dos elementos liberados no ensaio de lixiviação descrito pela NBR 10005, a concentração dos elementos liberados no ensaio de solubilização e a concentração encontrada na análise químicas das pastilhas. Assim, foram obtidos um coeficiente de difusão determinado por meio da (35 (NEN 7375), um coeficiente de difusão envolvendo a concentração dos elementos encontrados nas pastilhas e mais dois outros coeficientes de difusão considerando a concentração dos elementos liberados no ensaio de solubilização e no ensaio de lixiviação, descrito pela NBR 10005.

O coeficiente de difusão efetivo (De) engloba os efeitos do gradiente de concentração dos metais pesados entre o corpo sólido e o líquido lixiviante. Este gradiente de concentração intervém na migração

dos metais pesados da argamassa para a água. Como esta difusividade varia com as condições do material, ela dependerá da porosidade, tortuosidade, capilaridade, dentre outras propriedades.

Malviya R. e Chaudhary R. (2006) citam também, que o logaritmo da difusividade efetiva, denominado como  $\rho De$ , para cada contaminante, descreve o grau de mobilidade do mesmo, como é resumido na Tabela 6.

**Tabela 6 – Grau de mobilidade dos contaminantes**

$\rho De > 12,5$	Baixa Mobilidade
$11,0 < \rho De < 12,5$	Média Mobilidade
$\rho De < 11,0$	Alta Mobilidade

**Fonte:** Adaptado de MALVIYA *et al.* (2006).

Quanto menor o grau de mobilidade, maior o potencial de lixiviação dos contaminantes para o meio.

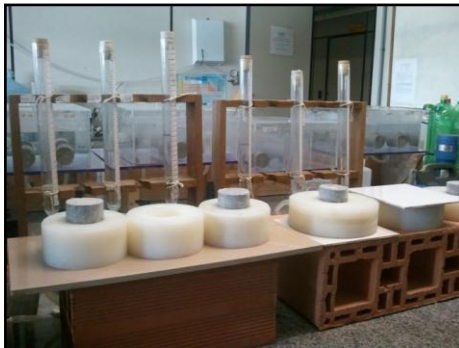
Durante as extrações se fez a medição da condutividade elétrica da amostra sólida por meio da impedância elétrica.

De acordo com a nova norma holandesa NEN 7375, avaliou-se os mecanismos de lixiviação que regem o ensaio de tanque: esgotamento, lavagem superficial, difusão e dissolução. Alguns critérios de solubilidade das argamassas que permaneceram dentro dos tanques também foram verificados a partir desta nova norma. O objetivo desta verificação de solubilidade é assegurar que o corpo de prova submetido ao ensaio de lixiviação em tanques não se dissolva ao ser imerso dentro da água. Os mecanismos de lixiviação são avaliados para que seja calculado o coeficiente de difusão somente dos elementos que efetivamente sofreram difusão durante o ensaio de tanque. Foram avaliados três critérios descritos nesta norma para a determinação dos mecanismos de lixiviação.

### 3.3.7 Absorção de água por capilaridade.

O experimento consistiu na submissão dos corpos de prova a uma lâmina d'água, a fim de que as amostras absorvessem a água por capilaridade. O volume de água absorvido foi controlado e medido com o auxílio de um tubo de Mariotte graduado, como pode ser visto na Figura 26.





**Figura 26 – Argamassas submetidas ao ensaio de absorção capilar.**

Inicialmente, com a colocação da amostra cimentícia em contato com uma lâmina d'água, as medidas de absorção foram medidas em intervalos de segundos. Em sequência, as medidas foram coletadas em intervalos de minutos e horas, até o período de 24 horas. Assim, foi obtido o estado de parcialmente saturada das argamassas sem que ocorresse a liberação dos metais pesados.

### 3.3.8 Tortuosidade

Para a determinação dos valores de tortuosidade, foram utilizadas a (25 apresentada no capítulo 2.4.3.

Para a resistividade da argamassa no estado úmido foi considerada a resistividade das argamassas aos 28 dias de cura. A resistividade da argamassa, encontrada após o ensaio de absorção capilar, foi considerada como a resistividade do fluido. Com a saturação parcial das argamassas por meio do ensaio de absorção capilar, a passagem da corrente elétrica imposta à matriz cimentícia ocorre preferencialmente na água. Assim a (25 foi modificada e apresentada na (36).

$$\tau = \frac{\rho_{28d}}{\rho_{\text{arg. úmida}}} \times I_v \quad (36)$$



## 4 RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

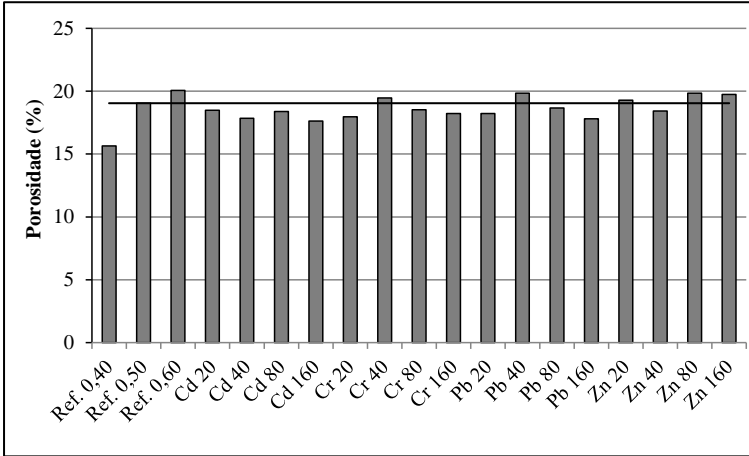
Após a moldagem das argamassas foram determinadas as suas densidades no estado fresco. Depois de 28 dias, da moldagem das argamassas, também se determinou as densidades do estado endurecido. Estas densidades foram apresentadas na Tabela 7.

**Tabela 7 - Densidade das argamassas no estado fresco e endurecido.**

	Amostras	$d_{\text{fresco}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$d_{\text{endurecido}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$
Relação a/c = 0,50	Ref 0,4	2,2	2,2
	Ref 0,5	2,2	2,2
	Ref 0,6	2,2	2,1
	Cd 20	2,2	2,0
	Cd 40	2,2	2,0
	Cd 80	2,1	2,0
	Cd 160	2,2	2,0
	Cr 20	2,2	2,1
	Cr 40	2,2	2,1
	Cr 80	2,2	2,0
	Cr 160	2,2	2,1
	Pb 20	2,2	2,1
	Pb 40	2,4	2,0
	Pb 80	2,2	2,1
	Pb 160	2,2	2,0
	Zn 20	2,2	2,0
	Zn 40	2,2	2,1
	Zn 80	2,2	2,0
	Zn 160	2,5	2,0

As porosidades das argamassas, tanto no estado fresco, como no estado endurecido, foram praticamente as mesmas. O traço e o controle do tempo de mistura, realizados durante a confecção das argamassas resultou em valores de densidades muito próximos.

De acordo com o procedimento descrito pela NBR 9778, os índices de vazios das argamassas que foram encontrados estão apresentados na Figura 27.



**Figura 27 – Índice de vazios das argamassas.**

O índice de vazios das argamassas variou entre 15 e 20%. Para as argamassas de referência com diferentes relações água/cimento, ocorreu um aumento da porosidade com o aumento da quantidade de água.

Em geral as porosidades das argamassas contaminadas apresentaram uma leve diminuição em relação à argamassa de referência de mesma relação a/c (0,50). Esta diminuição da porosidade também foi observada por Gineys *et al.* (2010). Apenas algumas amostras como a Cr 40, Pb 40, Zn 20, Zn 80 e Zn 160, que apresentaram porosidades maiores do que a argamassa de referencia (a/c igual a 0,50).

## 4.2 ANÁLISE QUÍMICA

Inicialmente, foram identificadas as concentrações dos metais nas argamassas de referência dos quatro metais em questão: Cd, Cr, Pb e Zn. A presença de tais metais nas argamassas de referência deve-se a presença destes elementos químicos no cimento Portland. A análise química das argamassas foi realizada numa amostra sólida, resultante da moagem das argamassas, em partículas cujo diâmetro foi inferior a 150 $\mu$ m, que por sua vez foi prensada em forma de uma pastilha. Os resultados da análise destas pastilhas estão apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8 – Concentrações dos metais encontrados nas argamassas.**

Concentração das pastilhas			Concentração das pastilhas		
Amostras	(ppm)	(mg/kg)	Amostras	(ppm)	(mg/kg)
<b>Ref. 0,40 (Cd)</b>	161,5	721,1	<b>Cd 80</b>	235,2	1065,6
<b>Ref. 0,40 (Cr)</b>	228,7	1021,6	<b>Cd 160</b>	300,5	1358,9
<b>Ref. 0,40 (Pb)</b>	141,9	633,9	<b>Cr 20</b>	141,9	644,1
<b>Ref. 0,40 (Zn)</b>	58,1	259,5	<b>Cr 40</b>	310,0	1396,3
<b>Ref. 0,50 (Cd)</b>	133,8	600,0	<b>Cr 80</b>	240,5	1083,9
<b>Ref. 0,50 (Cr)</b>	206,1	924,6	<b>Cr 160</b>	396,0	1777,7
<b>Ref. 0,50 (Pb)</b>	70,9	317,9	<b>Pb 20</b>	104,4	472,8
<b>Ref. 0,50 (Zn)</b>	128,9	578,0	<b>Pb 40</b>	153,0	706,4
<b>Ref. 0,60 (Cd)</b>	97,9	441,4	<b>Pb 80</b>	216,5	970,8
<b>Ref. 0,60 (Cr)</b>	148,6	669,8	<b>Pb 160</b>	232,6	1055,2
<b>Ref. 0,60 (Pb)</b>	155,5	701,0	<b>Zn 20</b>	160,6	731,7
<b>Ref. 0,60 (Zn)</b>	175,7	792,4	<b>Zn 40</b>	230,7	1035,3
<b>Cd 20</b>	224,4	1010,3	<b>Zn 80</b>	287,5	1292,6
<b>Cd 40</b>	118,7	532,0	<b>Zn 160</b>	418,2	1894,4

As argamassas Cd 40, Cr 20, Cr 80 apresentaram concentração de cádmio e cromo inferior à soma da quantidade apresentada na referência e a quantidade inicialmente adicionada. Como este fato só foi verificado nestas argamassas pode ter ocorrido uma falta de representatividade no momento da coleta das amostras sólidas, ou ainda, deve-se à influência dos sais de cromo que foram dissolvidos na água de amassamento. As composições de sais eram cristais hidratados e pode ter havido uma dissolução do metal cromo na alíquota de sal utilizada para a contaminação das argamassas.

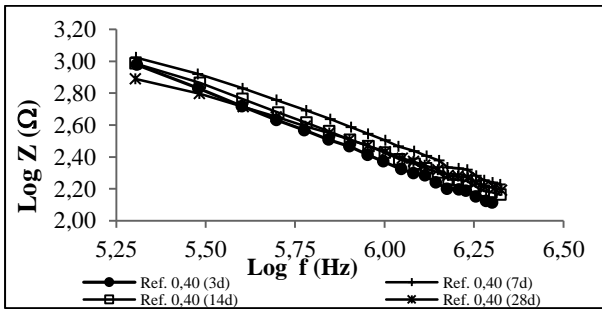
### 4.3 IMPEDÂNCIA ELÉTRICA

A impedância elétrica de todas as argamassas foi inversamente proporcional à frequência aplicada, correspondendo com a teoria apresentada no item 2.3.1. Com o aumento da idade de cura, ou seja, na medida em que ocorreu a hidratação, os gráficos  $\log Z (\Omega) \times \log f (\text{Hz})$  apresentaram uma maior inclinação das retas. Nota-se também que a adição de cádmio diminuiu a resistência elétrica total das argamassas. Os metais chumbo e zinco provocaram um aumento da resistência elétrica total das argamassas aos 28 dias de cura. Todos os metais provocaram um aumento da permissividade elétrica nas argamassas. Ou seja, todas as argamassas contaminadas, aos 28 dias de cura,

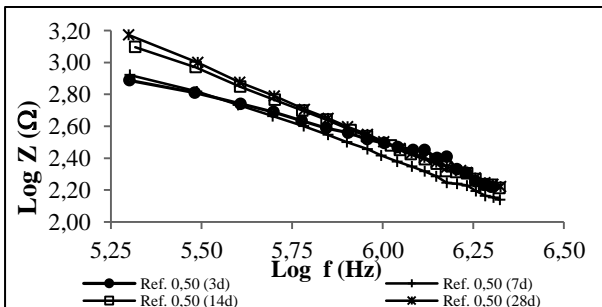
apresentaram permissividade elétrica maior do que a argamassa de referência.

### 4.3.1 Argamassas de referência

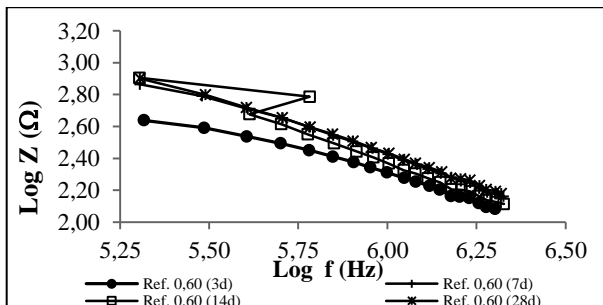
Com o aumento da idade de cura das argamassas de referência, os gráficos  $\log Z (\Omega) \times \log f (\text{Hz})$  apresentaram maior inclinação das retas. Este fato foi observado em maior significância para a argamassa de maior relação a/c, onde o índice de vazios da argamassa é maior. (Figura 28, Figura 29 e Figura 30).



**Figura 28 - Impedância elétrica da argamassa de referência (a/c igual a 0,40) em função do tempo de cura.**



**Figura 29 - Impedância elétrica da argamassa de referência (a/c igual a 0,50) em função do tempo de cura.**



**Figura 30 - Impedância elétrica da argamassa de referência (a/c igual a 0,60) em função do tempo de cura.**

Nas argamassas com um maior teor de água, a água corresponde como o principal condutor da corrente elétrica dentro da matriz. Isto faz com que a frequência interfira facilmente na ação de condução da corrente elétrica da água. Assim, a impedância elétrica varia de maneira mais significativa, com a variação da frequência aplicada. A variação da impedância elétrica em relação à idade de cura das argamassas foi maior nas menores frequências, como também foi verificado por Saltas *et al.* (2007). Segundo o autor, em menores frequências, qualquer variação na concentração de contaminantes ou no teor de água, resulta numa variação mais significativa da impedância.

Os espectros de impedância, relacionando as partes reais e imaginárias da impedância elétrica das argamassas de referência, estão apresentados nas Figuras Figura 31 a Figura 34. Para isto, foram obtidas as equações dos arcos obtidos com o ensaio e a partir destas equações foram determinados os pontos que faltavam do arco (raízes destas equações).

Os espectros de impedância mostraram que com o aumento da relação a/c igual das argamassas, maior a resistência elétrica total das mesmas aos 28 dias de cura (Figura 34). Este fato decorre da maior porosidade das argamassas com maior relação a/c e, portanto, como estes espaços vazios não conduzem a corrente elétrica, a resistência elétrica da amostra aumenta. E com o aumento da idade de cura, a capacitância elétrica total das amostras também aumentou (altura dos arcos).

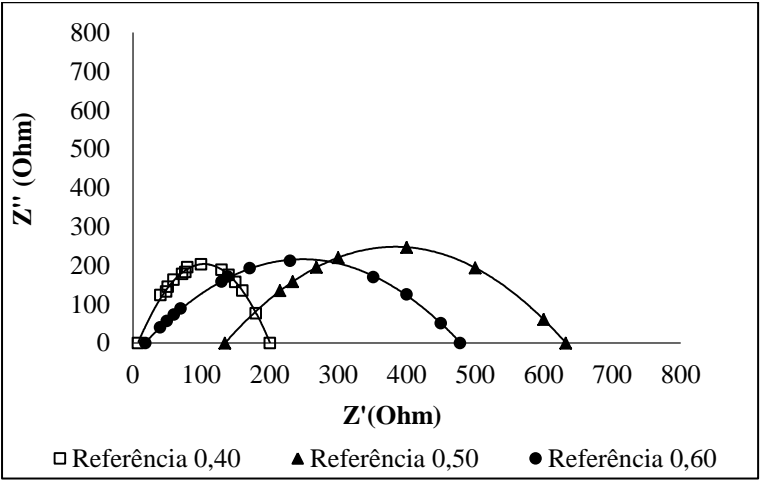


Figura 31 – Espectro de impedância das argamassas de referência aos três dias de cura.

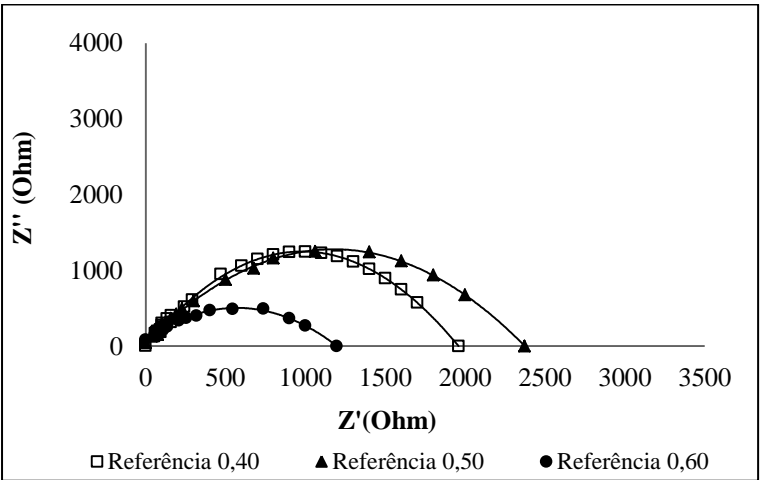


Figura 32 -- Espectro de impedância das argamassas de referência aos sete dias de cura.



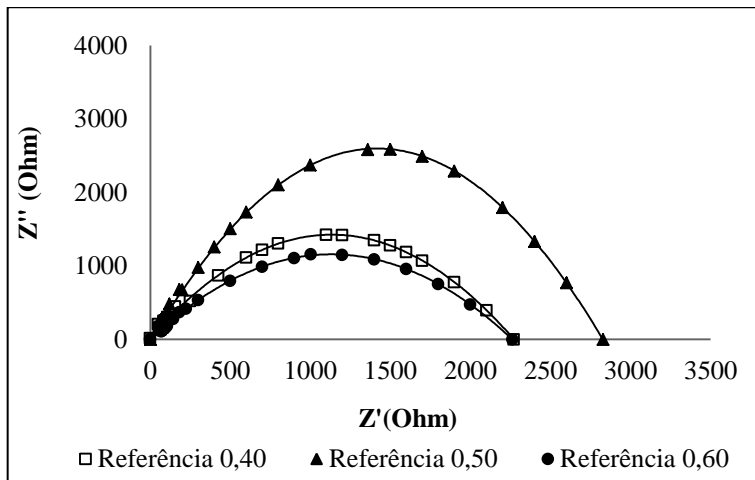


Figura 33 - Espectro de impedância das argamassas de referência aos 14 dias de cura.

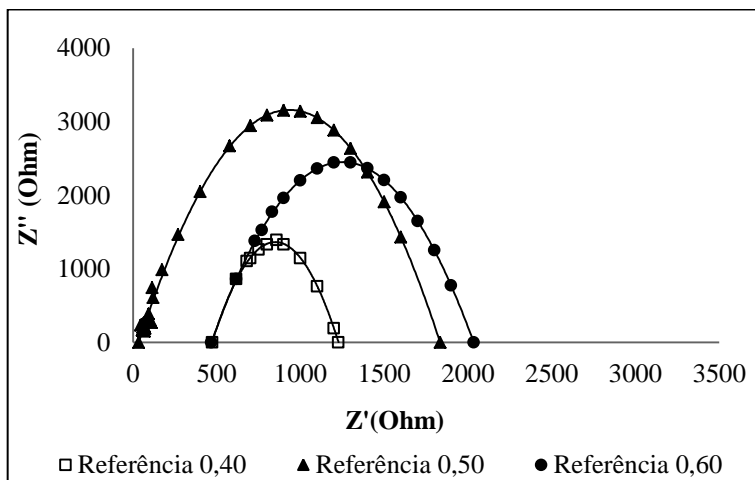
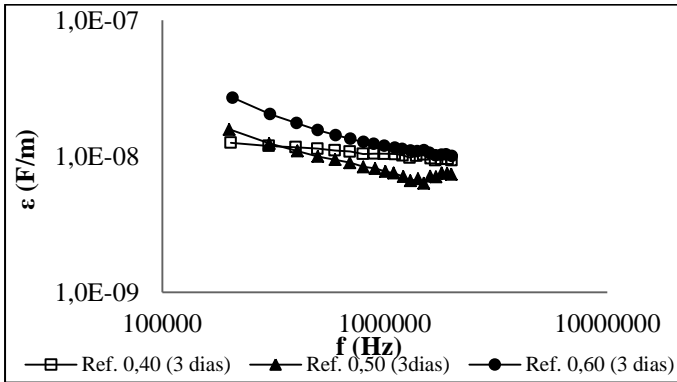


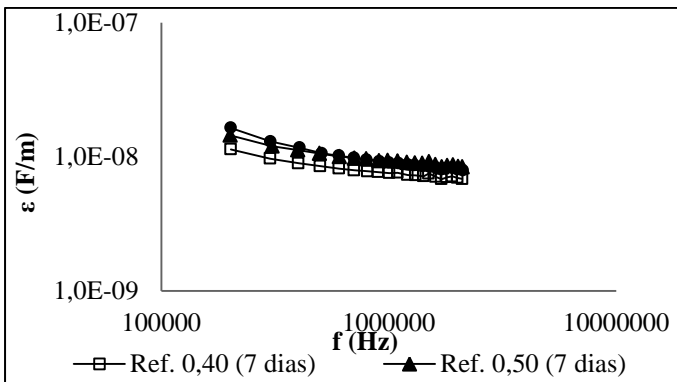
Figura 34 - Espectro de impedância das argamassas de referência aos 28 dias de cura.

Em relação à permissividade elétrica das argamassas de referência, a amostra de maior relação a/c (0,60) apresentou maior permissividade elétrica nas idades iniciais até 14 dias de cura. Depois com o tempo, sua resistência elétrica vai aumentando e resultando numa

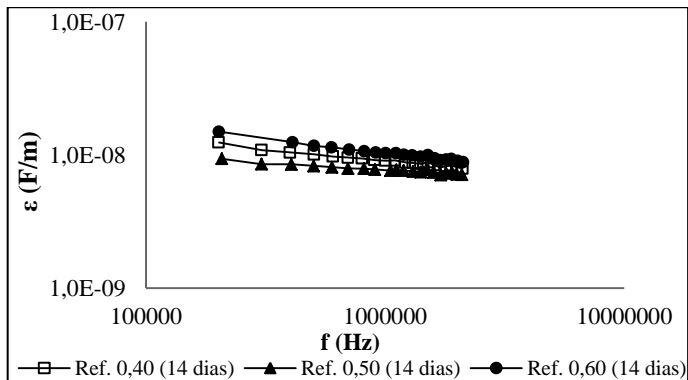
menor permissividade elétrica. Quanto maior a relação a/c das argamassas, maior é a inclinação das retas obtidas no gráfico da permissividade ( $\epsilon$ ) x frequência (f) aos três dias de cura (Figuras Figura 35 – Permissividade elétrica das argamassas de referência aos sete dias de cura. a Figura 38 – Permissividade elétrica das argamassas de referência aos 28 dias de cura.).



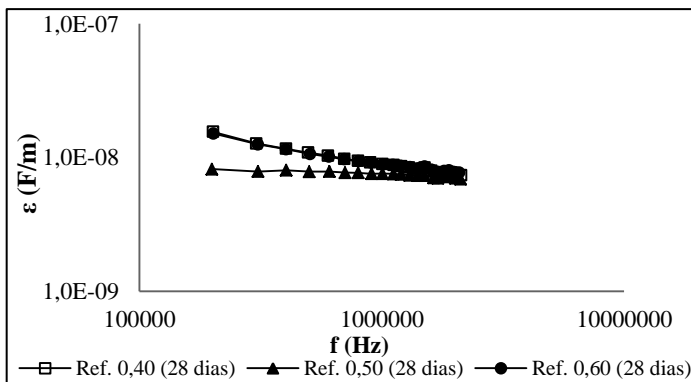
**Figura 35 – Permissividade elétrica das argamassas de referência aos sete dias de cura.**



**Figura 36 – Permissividade elétrica das argamassas de referência aos sete dias de cura.**



**Figura 37 – Permissividade elétrica das argamassas de referência aos 14 dias de cura.**



**Figura 38 – Permissividade elétrica das argamassas de referência aos 28 dias de cura.**

A resistência elétrica total das argamassas (ponto onde os arcos dos espectros de impedância interceptam o eixo das abscissas) foi verificada ao longo do processo de hidratação (Figura 39). De acordo com as argamassas de referência, que não foram contaminadas, a resistência elétrica aumentou com o tempo até os 14 dias de cura e depois diminuiu um pouco aos 28 dias. Como foi verificado nos espectros de impedância, aos 28 dias, com o aumento da relação a/c, aumentou a resistência elétrica total das argamassas.

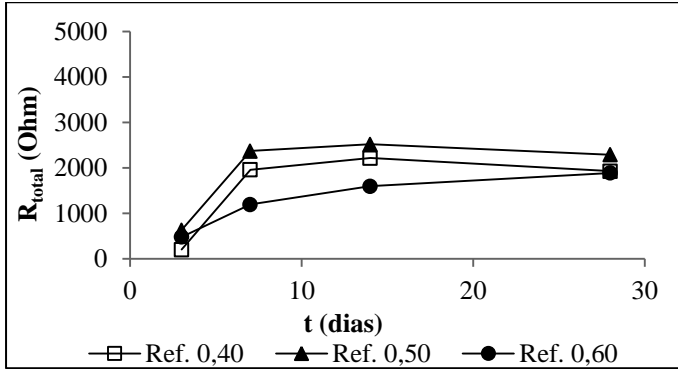


Figura 39 – Resistência elétrica total das argamassas de referência.

### 4.3.2 Cádmi

As argamassas contaminadas com cádmio apresentaram uma diminuição de inclinação das curvas do gráfico  $\log Z (\Omega) \times \log f (\text{Hz})$  com o aumento do teor de contaminação. E uma maior inclinação destas curvas foi verificada mesmo aos 14 e 28 dias de cura, para a argamassa contaminada com 160 ppm de cádmio (Figuras Figura 40 a Figura 43). Ou seja, a adição do metal pesado provocou alguma alteração física e/ou química nas argamassas durante o processo de hidratação.

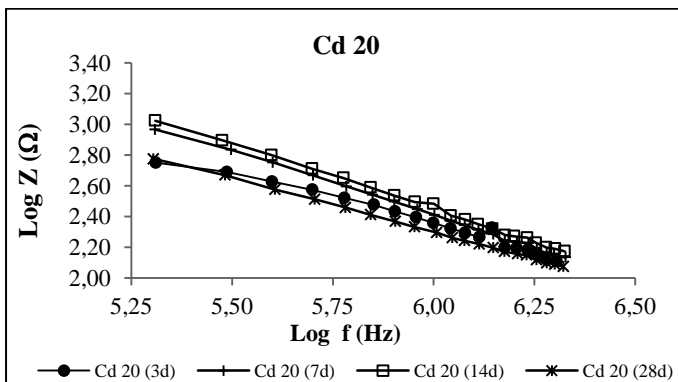
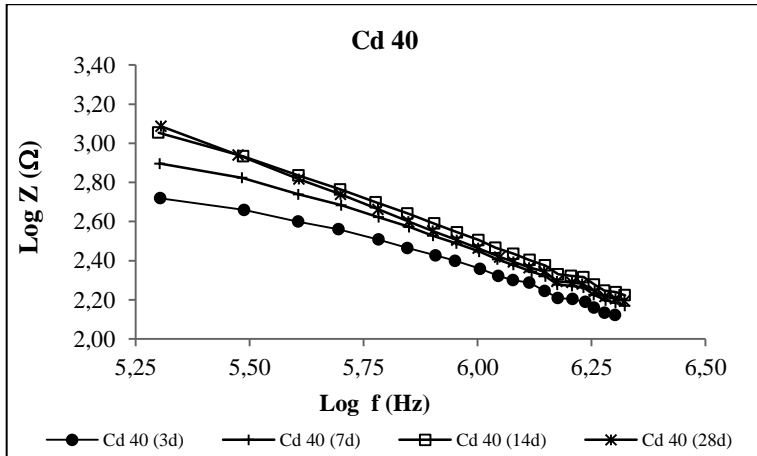
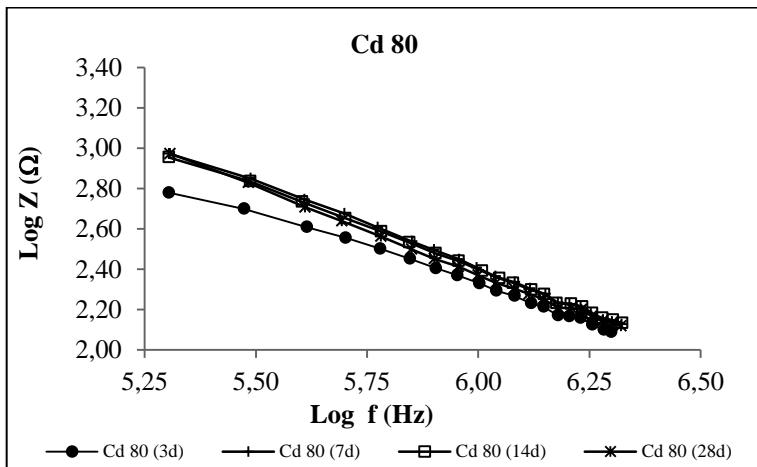


Figura 40 - Impedância elétrica da argamassa Cd 20 em função do tempo de cura.



**Figura 41 - Impedância elétrica da argamassa Cd 40 em função do tempo de cura.**



**Figura 42 - Impedância elétrica da argamassa Cd 80 em função do tempo de cura.**

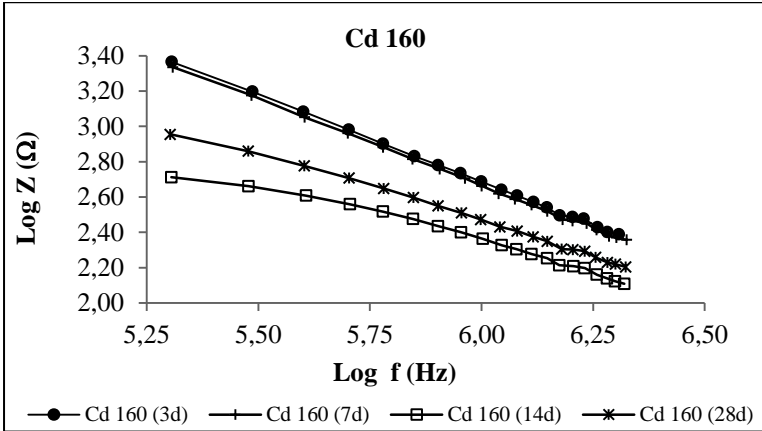


Figura 43 – Impedância elétrica da argamassa Cd 160 em função do tempo de cura.

A impedância elétrica da argamassa Cd 160 diminuiu com a idade de cura das argamassas como foi verificado por Gu *et al.* (1992).

As permissividades elétricas das argamassas contaminadas com cádmio estão apresentadas nas Figuras Figura 44 a Figura 47. Com a evolução do processo de hidratação, as argamassas contaminadas apresentaram permissividade elétrica maior do que a argamassa de referência, a partir dos 14 dias de cura. No entanto, os níveis de contaminação de cádmio não foram possíveis de ser detectados a partir da permissividade elétrica.

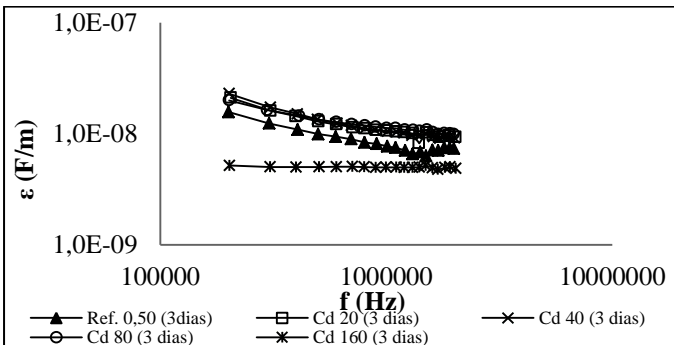
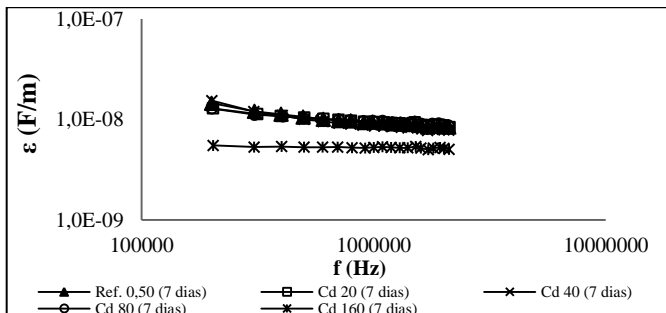
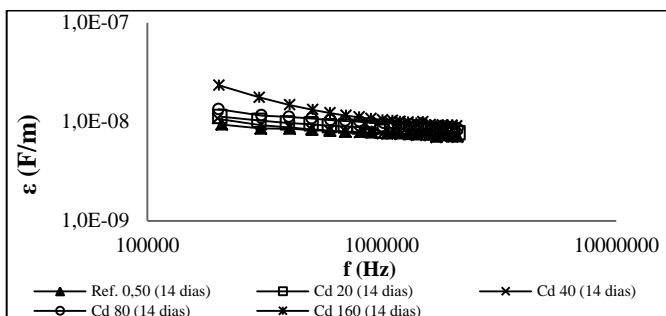


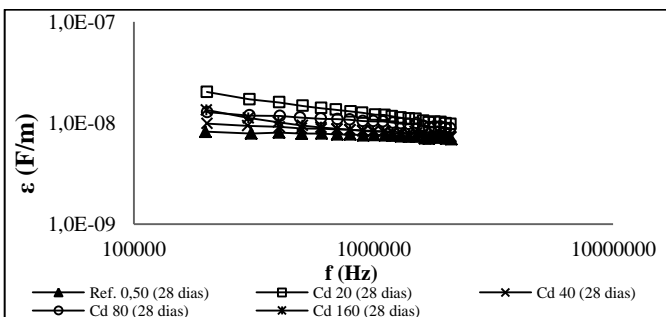
Figura 44 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cádmio aos três dias de cura.



**Figura 45 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cádmio aos sete dias de cura.**



**Figura 46 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cádmio aos 14 dias de cura.**



**Figura 47 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cádmio aos 28 dias de cura.**

A argamassa contaminada com 160 ppm de cádmio apresentou, em todas as idades, a menor resistência elétrica total nos espectros de

impedância, apresentados nas Figuras Figura 48 a Figura 51. Com o aumento do tempo de cura das argamassas, também foi possível verificar que os arcos vão ficando mais altos e estreitos. A capacitância elétrica das argamassas que por sua vez, correspondem à região de interface sólido-líquido, responsável pelo efeito da dupla camada capacitiva aumentou com a idade de cura. Gu *et al.* (1992) comentam que nas idades iniciais (48h) a rigidez das pastas de cimento é muito baixa para detectar o comportamento capacitivo. Logo, com o aumento da idade de cura, nas argamassas contaminadas, aumentou a propriedade capacitiva das mesmas.

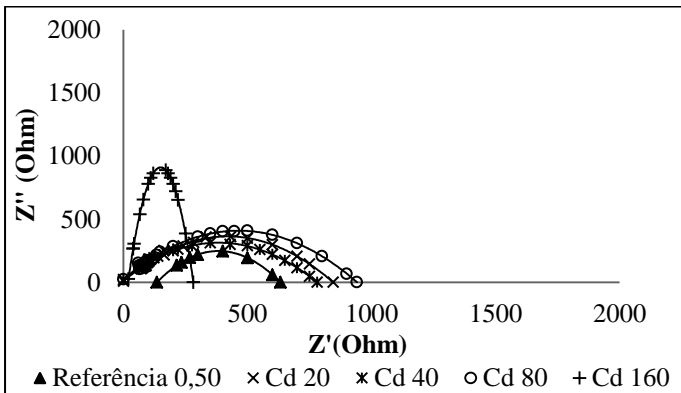


Figura 48 – Espectro de impedância das argamassas de referência aos três dias de cura.

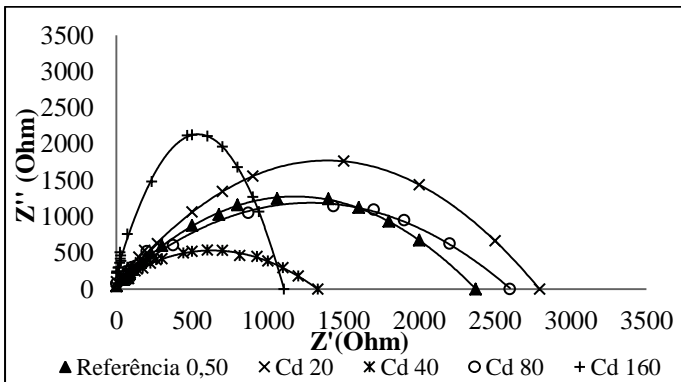
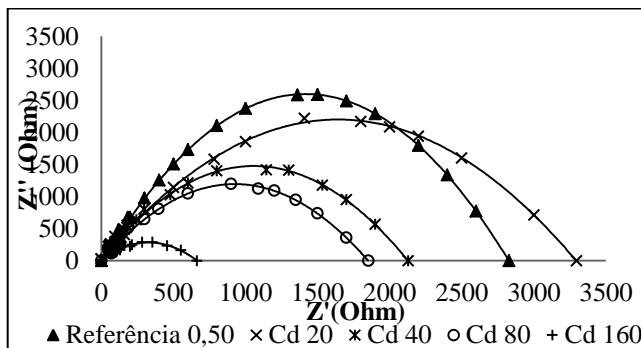


Figura 49 - Espectro de impedância das argamassas de referência aos sete dias de cura.

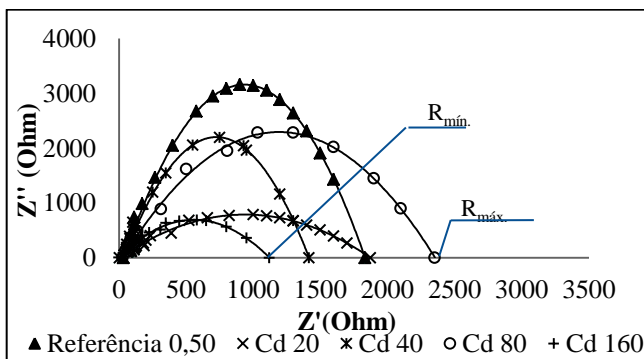


Aos 14 dias de cura a argamassa contaminada com 20 ppm de cádmio ainda apresenta a maior resistência elétrica total (Figura 50) e com o aumento no teor de contaminação a resistência elétrica das argamassas diminuiu.



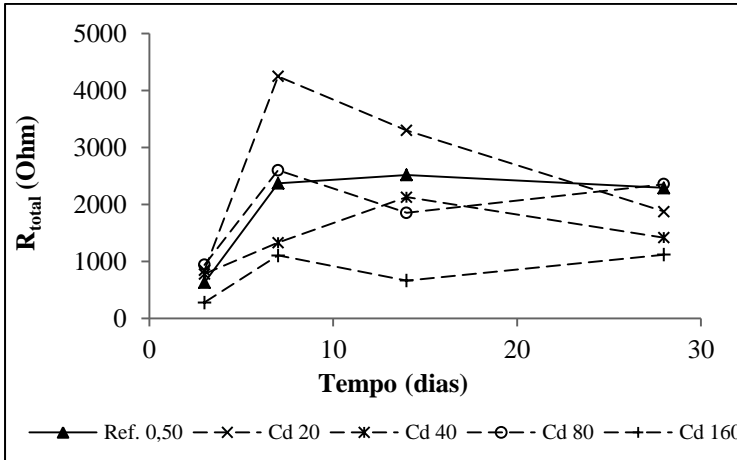
**Figura 50 - Espectro de impedância das argamassas de referência aos 14 dias de cura.**

A argamassa contaminada com 80 ppm de cádmio apresentou a maior resistência elétrica total aos 28 dias de cura e a amostra contaminada com 160 ppm a menor resistência elétrica total (Figura 51). O aumento da resistência elétrica da argamassa contaminada com 80 ppm de cádmio pode ser explicada pela maior porosidade apresentada por esta amostra.



**Figura 51 - Espectro de impedância das argamassas de referência aos 28 dias de cura.**

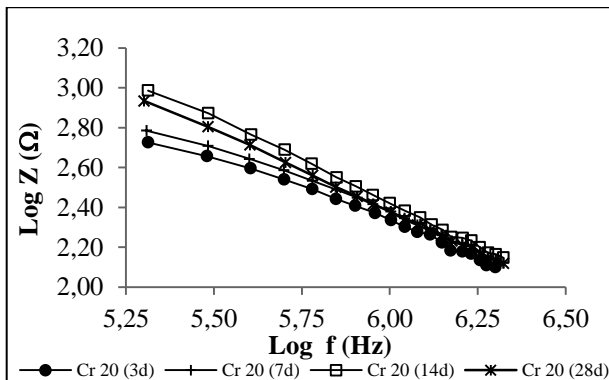
As resistências elétricas totais das argamassas contaminadas com 20 e 80 ppm de cádmio foram maiores do que a da argamassa de referência, aos 28 dias de cura. A argamassa contaminada com 160 ppm de cádmio apresentou a menor resistência elétrica total ao longo do tempo analisado (Figura 52). A maior concentração do metal provocou uma diminuição da resistência elétrica.



**Figura 52 – Resistência elétrica total das argamassas contaminadas com cádmio.**

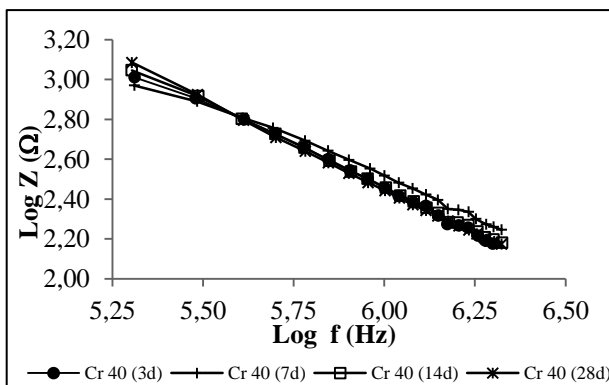
### 4.3.3 Cromo

Os gráficos logarítmicos da impedância elétrica em relação a frequência das argamassas contaminadas com cromo foram apresentadas nas Figuras Figura 53 a Figura 56. A inclinação das curvas nestes gráficos aumentou com a idade de cura e diminuiu com o aumento do teor de contaminação.



**Figura 53 - Impedância elétrica da argamassa Cr 20 em função do tempo de cura.**

Na argamassa contaminada com 40 ppm de cromo, os valores da impedância elétrica quase não variaram ao longo do período de cura e se inverteram acima de 300 kHz de frequência. Ocorreu uma alteração estrutural nesta argamassa que provocou esta inversão da impedância elétrica.



**Figura 54 - Impedância elétrica da argamassa Cr 40 em função do tempo de cura.**

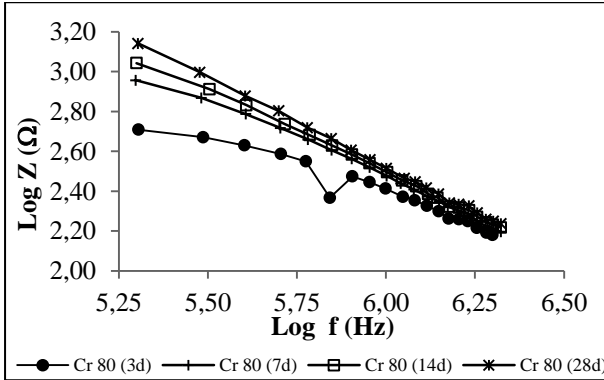


Figura 55 Impedância elétrica da argamassa Cr 80 em função do tempo de cura.

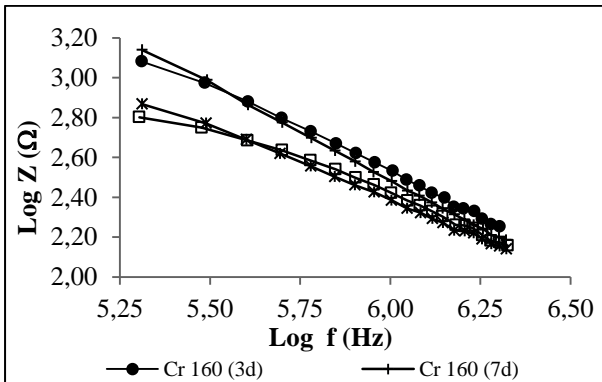
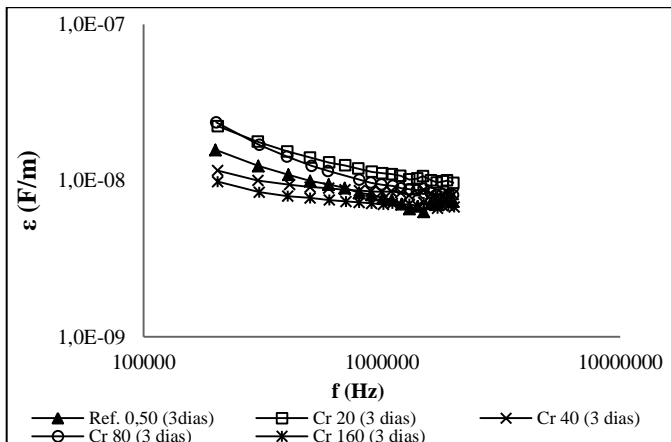
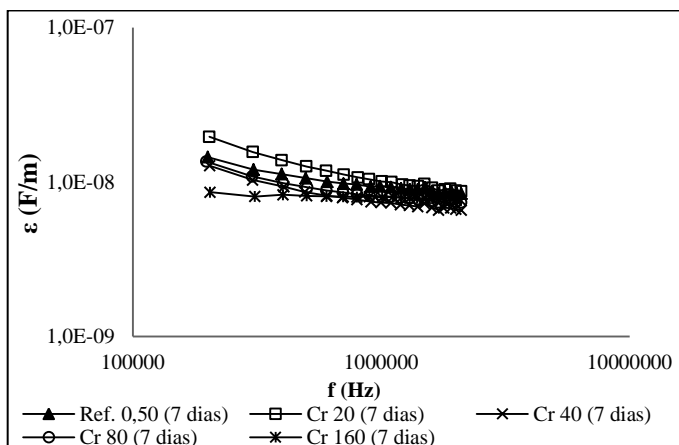


Figura 56 - Impedância elétrica da argamassa Cr 160 em função do tempo de cura.

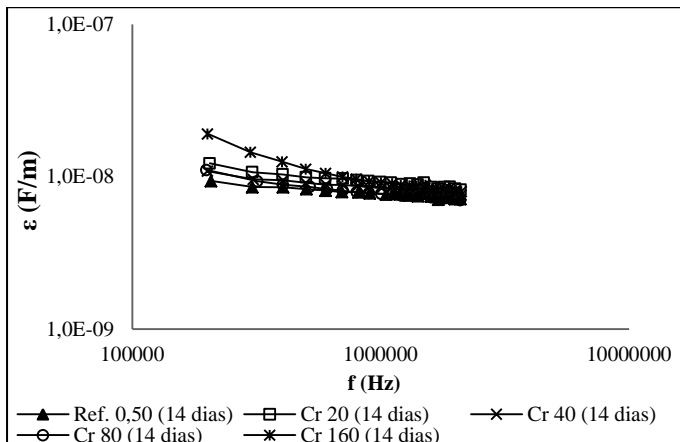
Nas argamassas contaminadas com cromo houve maior distinção das permissividades elétricas entre as amostras durante o início do processo de hidratação (Figura 57, Figura 58 e Figura 59). A partir dos 14 dias de cura, todas as argamassas contaminadas apresentaram permissividade elétrica maior do que a permissividade da argamassa de referência.



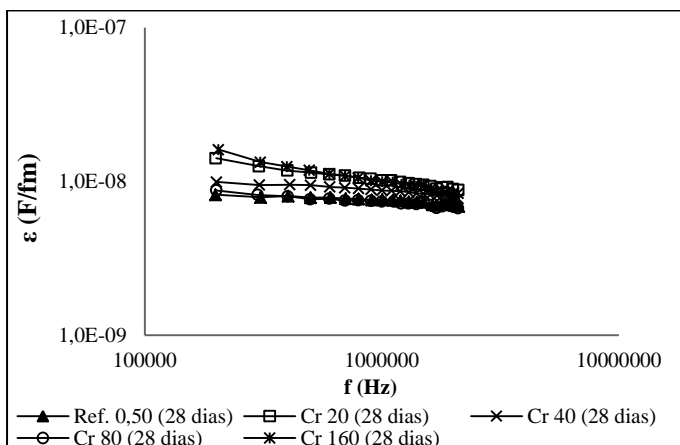
**Figura 57 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cromo aos três dias de cura.**



**Figura 58 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cromo aos sete dias de cura.**



**Figura 59 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cromo aos 14 dias de cura.**



**Figura 60 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com cromo aos 28 dias de cura.**

Nos espectros das argamassas contaminadas com cromo (Figura 61, Figura 62, Figura 63 e Figura 64) o diâmetro dos arcos aumentou com o a evolução do tempo de hidratação. Com o aumento da idade de cura, a água livre presente nos poros das argamassas é consumida nas reações de hidratação do cimento, dificultando a passagem da corrente elétrica através da amostra, resultando no aumento da resistência elétrica. Desde as idades iniciais até os 28 dias de cura, a argamassa

contaminada com 40 ppm de cromo apresentou os maiores valores de resistência elétrica total entre as argamassas contaminadas. Este aumento da resistência elétrica total desta argamassa é devido a sua porosidade maior do que as porosidades das demais argamassas contaminadas.

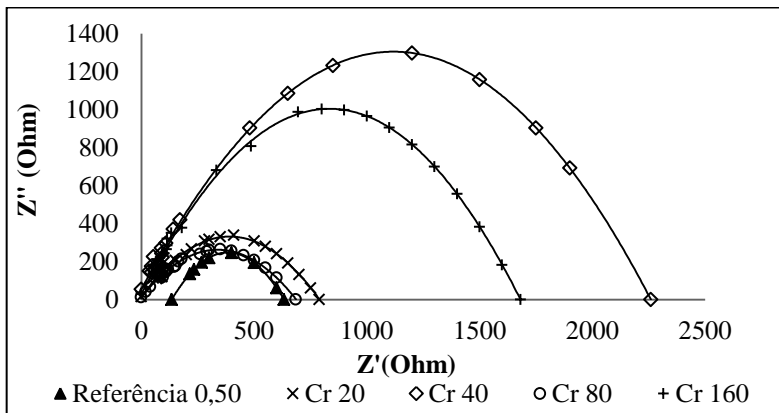


Figura 61 - Espectro de impedância das argamassas contaminadas com cromo aos três dias de cura.

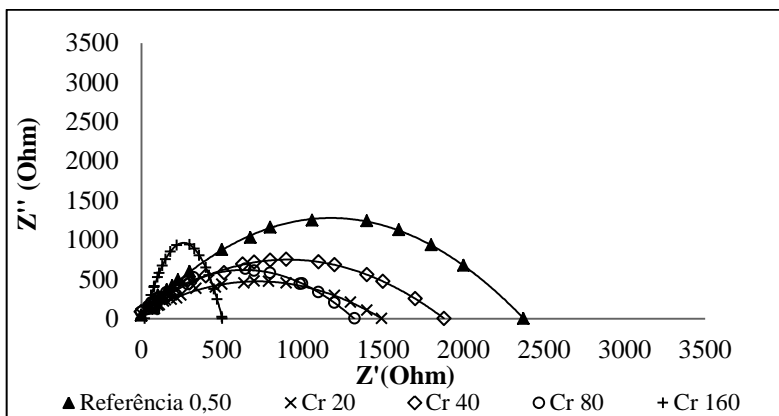
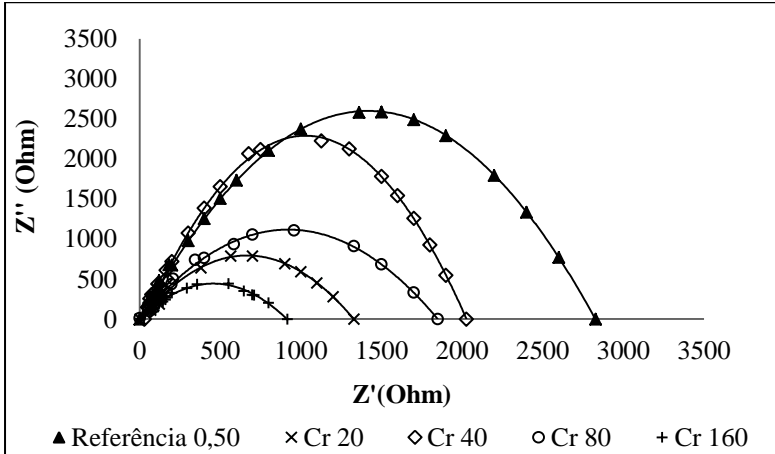
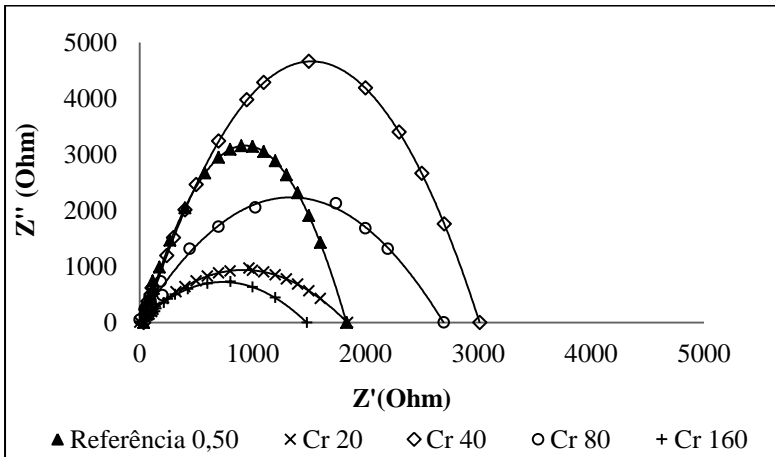


Figura 62 - Espectro de impedância das argamassas contaminadas com cromo aos sete dias de cura.



**Figura 63 - Espectro de impedância das argamassas contaminadas com cromo aos 14 dias de cura.**



**Figura 64 - Espectro de impedância das argamassas contaminadas com cromo aos 28 dias de cura.**

As argamassas contaminadas com cromo apresentaram um aumento da resistência ao longo do tempo de hidratação (Figura 65). Durante os sete e 14 dias de cura, todas as argamassas contaminadas apresentaram resistência menor do que a argamassa de referência. Aos 28 dias, a resistência elétrica da argamassa de referência diminuiu e das argamassas contaminadas aumentou. As argamassas contaminadas com



40 e 80 ppm de cromo apresentaram resistência elétrica maior as amostras contaminadas com 20 e 160 ppm porque apresentaram maiores porosidades.

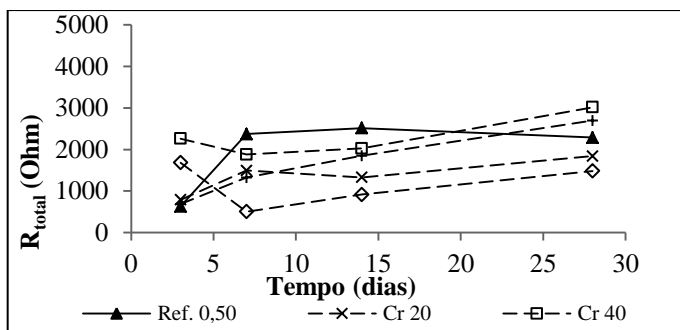


Figura 65 – Resistência elétrica total das argamassas contaminadas com cromo.

#### 4.3.4 Chumbo

O metal chumbo ocasionou uma diminuição na impedância elétrica aos 28 dias de cura (Figura 69). A inclinação das curvas do  $\log Z \times \log f$  foi nitidamente influenciada pela adição de chumbo nas argamassas. Com o aumento da adição de chumbo e o aumento da idade de cura, diminuiu a inclinação destas curvas (Figuras Figura 66 a Figura 69).

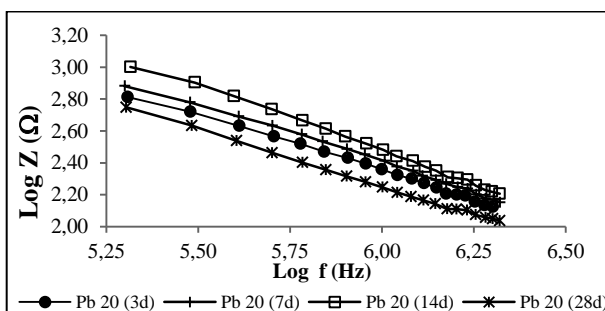
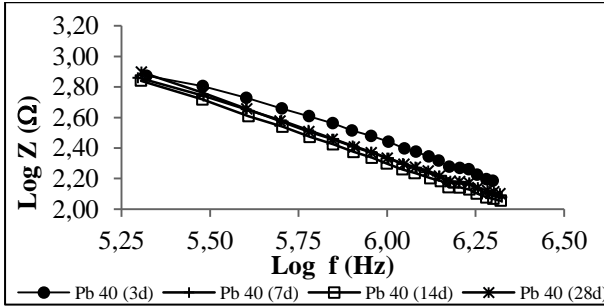
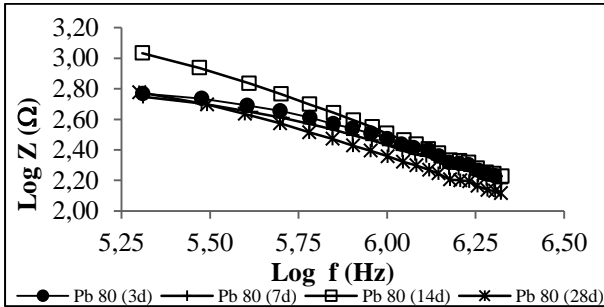


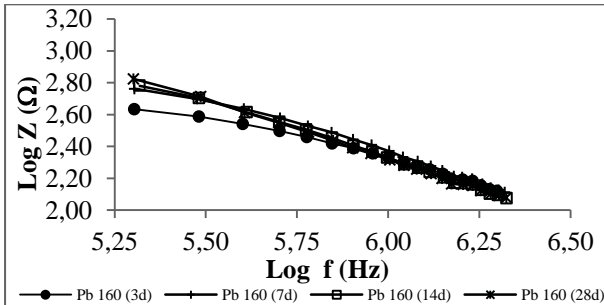
Figura 66 - Impedância elétrica da argamassa Pb 20 em função do tempo.



**Figura 67 - Impedância elétrica da argamassa Pb 40 em função do tempo de cura.**



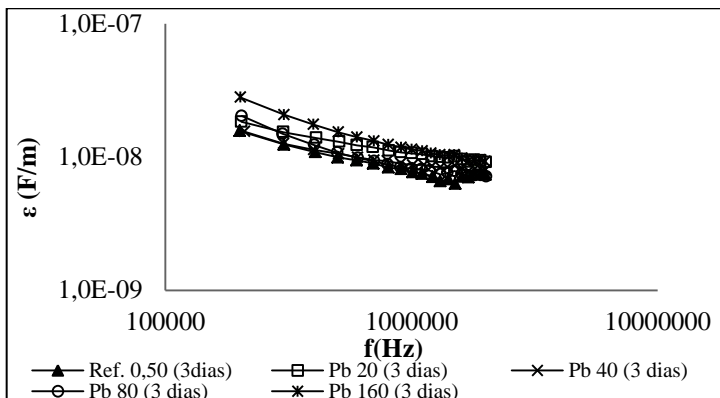
**Figura 68 - Impedância elétrica da argamassa Pb 80 em função do tempo de cura.**



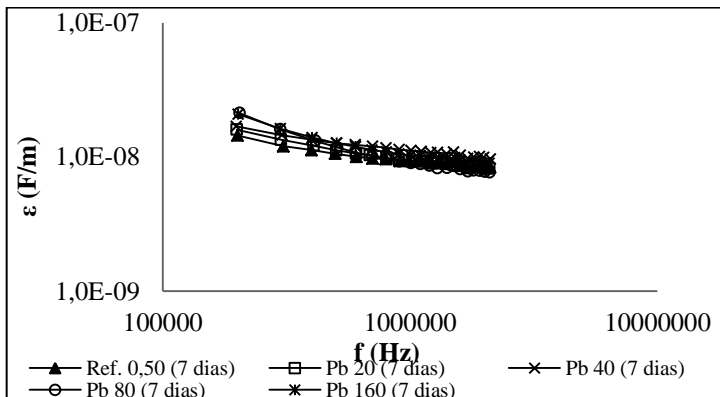
**Figura 69 - Impedância elétrica da argamassa Pb 160 em função do tempo de cura.**

As permissividades elétricas de todas as argamassas contaminadas com chumbo, nas concentrações de 20, 40, 80 e 160 ppm, foram maiores do que a da referência durante todo o período de cura

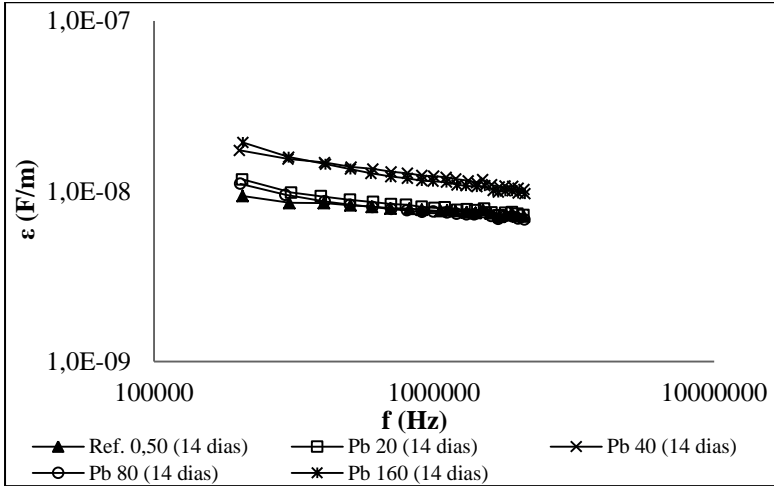
analisado (Figura 70, Figura 71, Figura 72 e Figura 73). Aos 28 dias, a diferença nos valores da permissividade elétrica entre as amostras contaminadas e a de referência, foi maior e mais significativa (Figura 73).



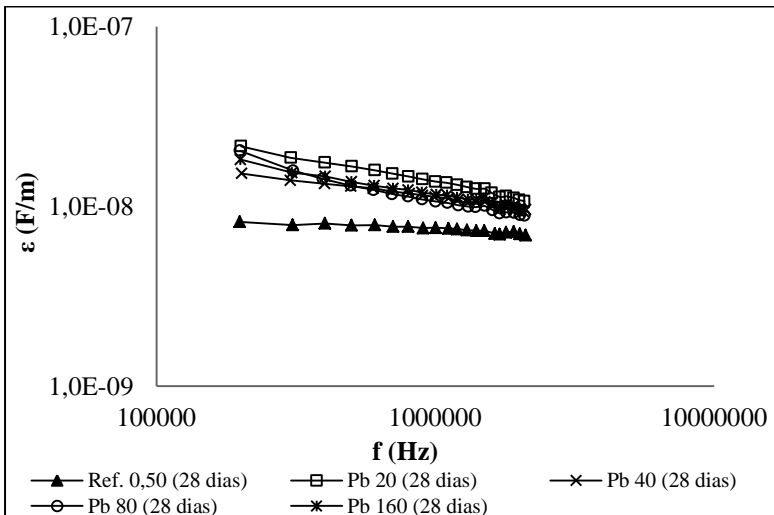
**Figura 70 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com chumbo aos três dias de cura.**



**Figura 71 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com chumbo aos sete dias de cura.**



**Figura 72 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com chumbo aos 14 dias de cura.**



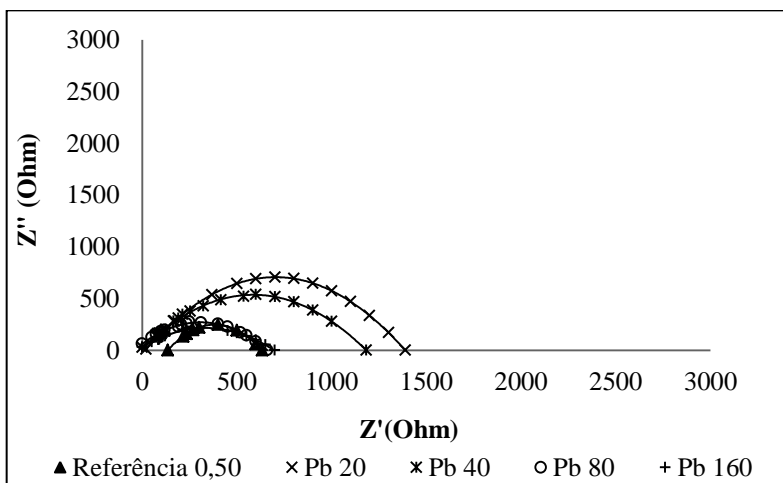
**Figura 73 - Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com chumbo aos 28 dias de cura.**

Os espectros de impedância elétrica das argamassas contaminadas com chumbo estão apresentados nas Figuras Figura 74 a Figura 77. No início do período de cura as argamassas contaminadas apresentaram

resistências elétricas totais maiores do que a resistência elétrica total da argamassa de referência. Com o aumento da idade de cura as argamassas contaminadas apresentam resistências elétricas menores do que a argamassa de referência. Estas argamassas Pb 20, Pb 80 e Pb 160 apresentaram porosidades menores do que a argamassa de referência e quanto menor a porosidade das argamassas, menor a resistência elétrica.

A altura dos arcos de impedância elétrica aumentou em menor proporção do que o arco da argamassa de referência. Isto significa que o metal chumbo se fixou ou interagiu com os compostos do cimento de maneira distinta dos demais metais pesados.

Com 14 dias de cura, quanto maior o teor de contaminação das argamassas, menor a resistência elétrica total (Figura 76). Aos 28 dias de cura a argamassa contaminada com 160 ppm de chumbo apresentou uma das menores resistências elétricas ao longo dos 28 dias de cura.



**Figura 74 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com chumbo aos três dias de cura.**

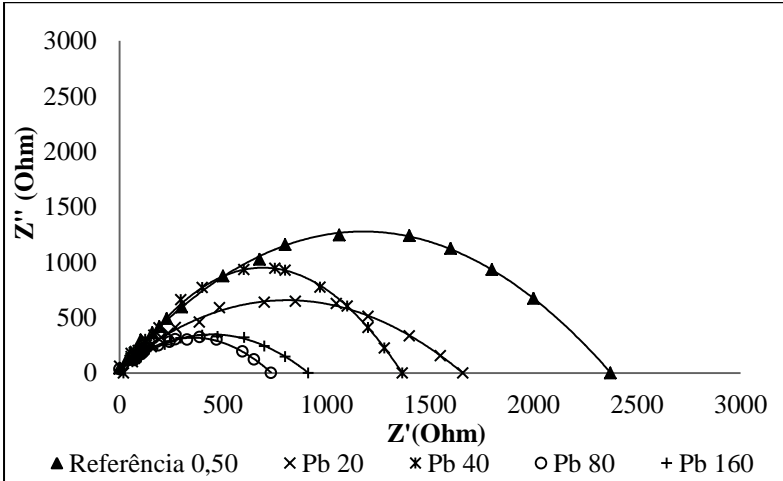


Figura 75 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com chumbo aos sete dias de cura.

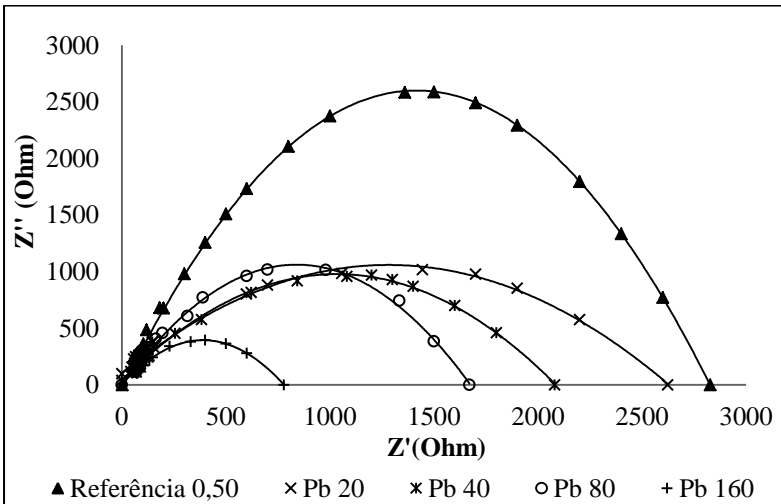
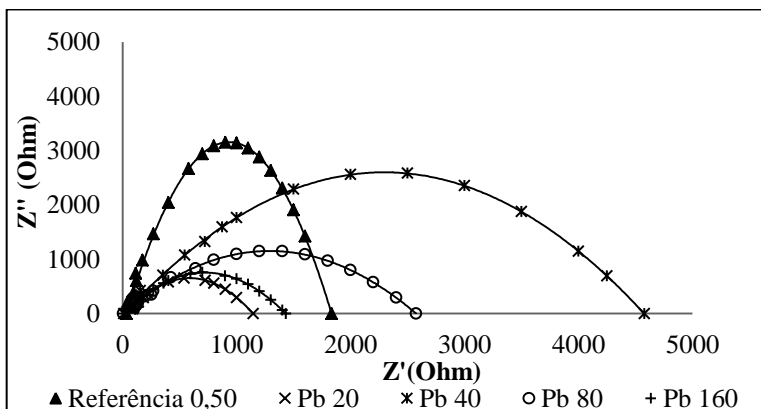


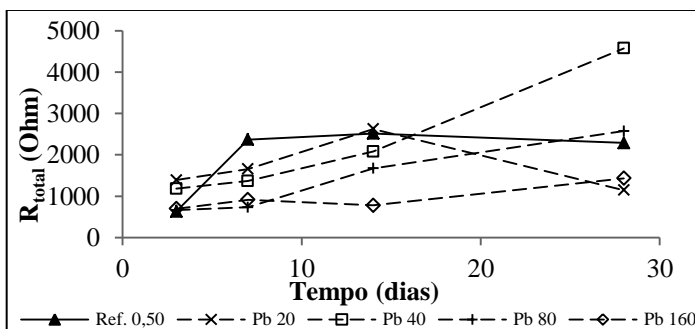
Figura 76 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com chumbo aos 14 dias de cura.

A argamassa contaminada com 40 ppm de chumbo apresentou a maior resistência elétrica total, devido a maior porosidade da amostra (Figura 77).



**Figura 77 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com chumbo aos 28 dias de cura.**

A argamassa contaminada com 20 ppm de chumbo apresentou uma evolução da resistência elétrica total bastante semelhante à amostra de referência. Nas contaminações de 40, 80 e 160 ppm, a resistência elétrica total das argamassas aumentou com o tempo de cura (Figura 78).



**Figura 78 - Resistência elétrica total das argamassas contaminadas com chumbo.**

#### 4.3.5 Zinco

A argamassa contaminada com 40 ppm de zinco apresentou um aumento de impedância elétrica ao longo do tempo de hidratação

(Figura 80). As demais argamassas contaminadas com zinco (20, 80 e 160 ppm) ocasionaram uma diminuição da impedância elétrica ao longo do tempo de hidratação (Figura 79, Figura 81 e Figura 82). A inclinação das curvas  $\log Z \times \log f$ , diminui com o aumento do teor de contaminação e a idade de cura das argamassas.

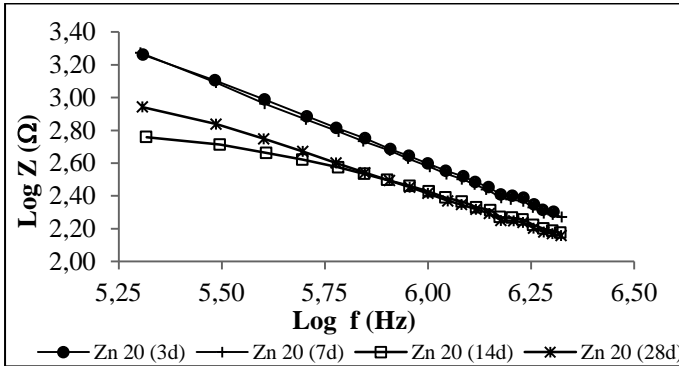


Figura 79 – Impedância elétrica da argamassa Zn 20 em função do tempo de cura.

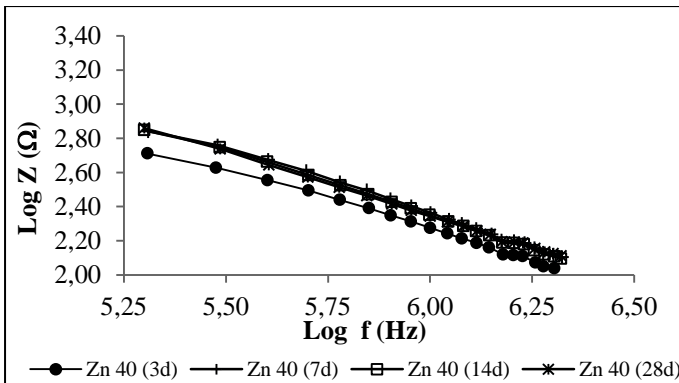
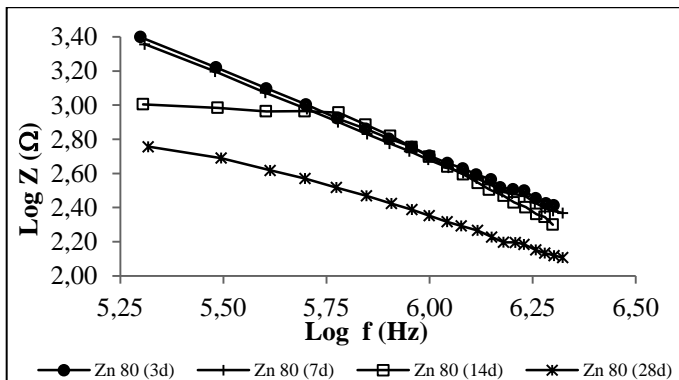
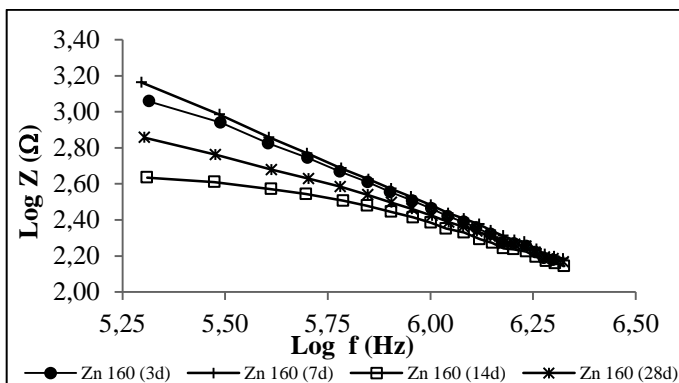


Figura 80 - Impedância elétrica da argamassa Zn 40 em função do tempo de cura.





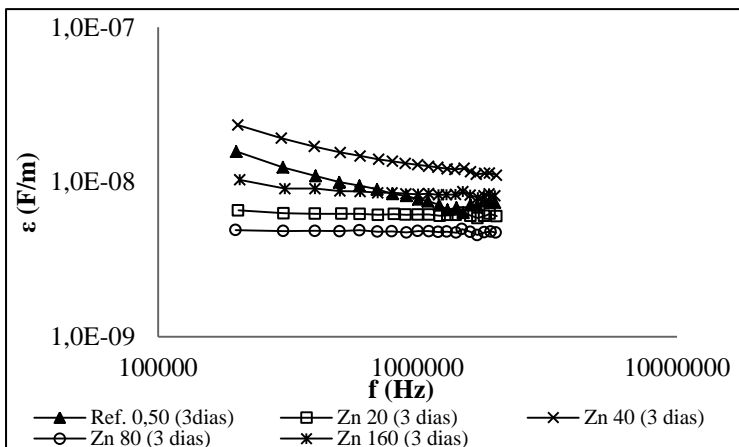
**Figura 81 - Impedância elétrica da argamassa Zn 80 em função do tempo de cura.**



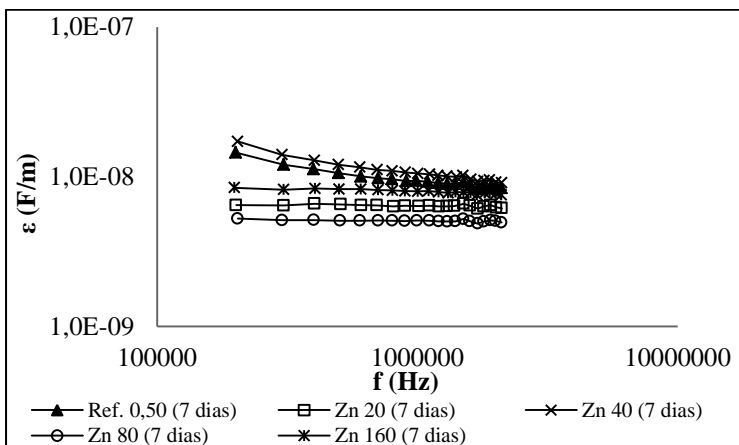
**Figura 82 - Impedância elétrica da argamassa Zn 160 em função do tempo de cura.**

Nas argamassas contaminadas com zinco, no início do processo de hidratação houve uma grande variação das curvas de permissividade elétrica entre as argamassas (

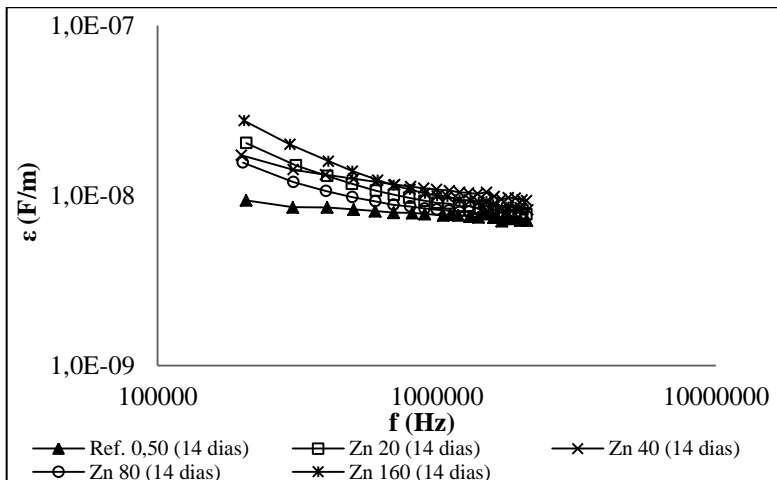
Figura 83 e Figura 84). Com o aumento do tempo de hidratação, essa variação da permissividade foi diminuindo e todas as argamassas contaminadas apresentaram permissividades maiores do que a argamassa de referência a partir dos 14 dias de cura (Figura 85 e Figura 86).



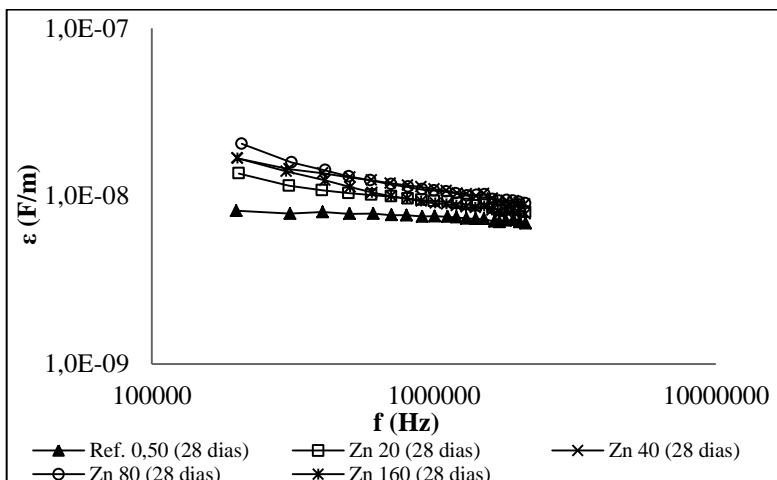
**Figura 83 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com zinco aos três dias de cura.**



**Figura 84 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com zinco aos sete dias de cura.**



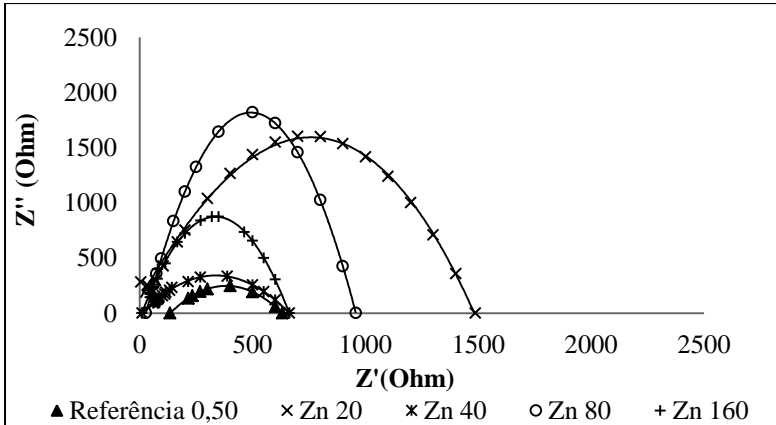
**Figura 85 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com zinco aos 14 dias de cura.**



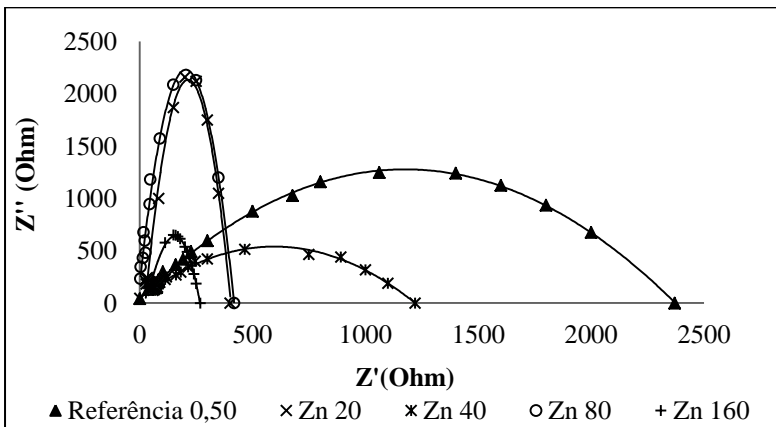
**Figura 86 – Permissividade elétrica das argamassas contaminadas com zinco aos 28 dias de cura.**

Nos espectros de impedância das argamassas contaminadas com zinco (Figuras Figura 87 a Figura 90), demonstram que aos três e aos sete dias de cura as argamassas contaminadas com zinco apresentaram capacitância bastante significativa. Possivelmente o zinco pode ter

alterado o tempo de hidratação das argamassas. A partir dos sete dias de cura, todas as argamassas contaminadas com zinco apresentaram resistências elétricas totais menores do que a argamassa de referência.



**Figura 87 – Espectros de impedância das argamassas contaminadas com zinco aos três dias de cura.**



**Figura 88 – Espectros de impedância das argamassas contaminadas com zinco aos sete dias de cura.**

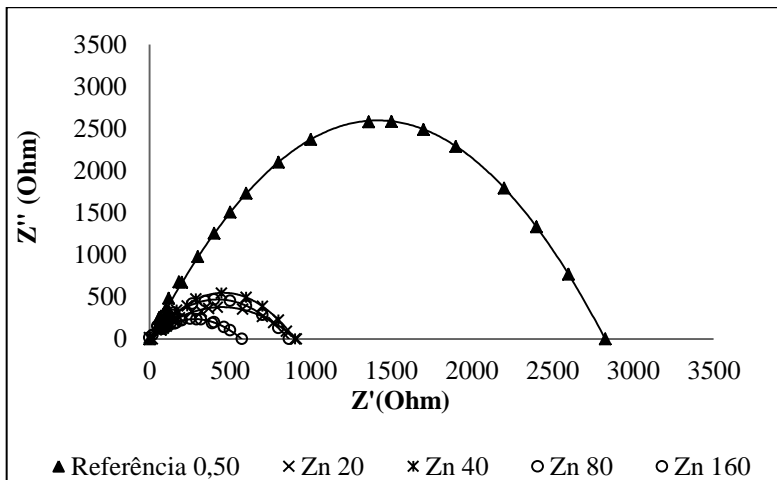


Figura 89 – Espectros de impedância das argamassas contaminadas com zinco aos 14 dias de cura.

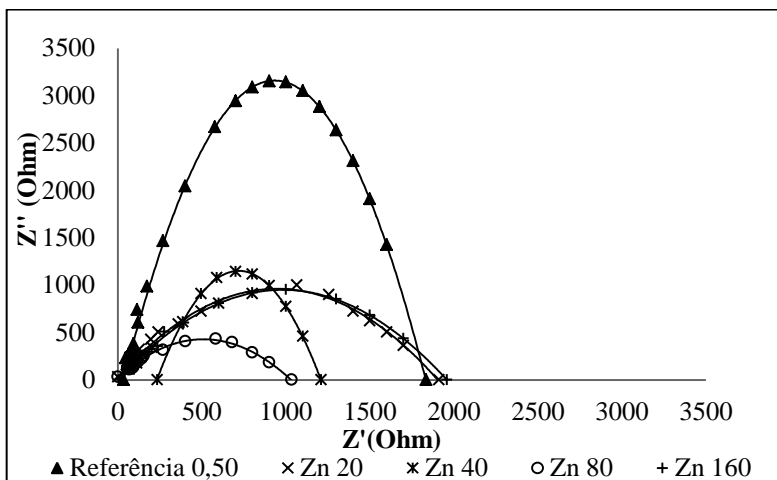
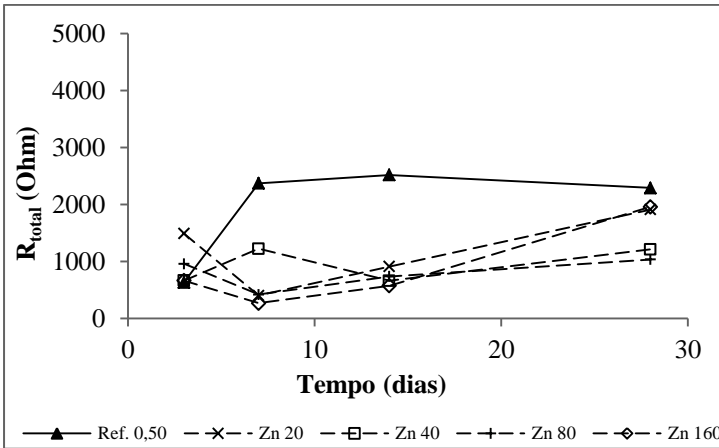


Figura 90 - - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com zinco aos 28 dias de cura.

As argamassas contaminadas com zinco apresentaram um aumento na resistência elétrica ao longo do tempo de hidratação e aos 28 dias, somente a argamassas contaminada com 80 ppm de zinco

apresentou resistência elétrica menor do que a argamassa de referência (Figura 91).



**Figura 91 – Resistência elétrica total das argamassas contaminadas com zinco.**

Para todas as argamassas a impedância elétrica diminuiu com o aumento da frequência. Houve uma maior distinção das curvas  $\log(Z)$  x  $\log(f)$  na faixa das menores frequências. Possivelmente em maiores frequências ocorreram maiores interferências da região de interface amostra/eletrodo. Devido a esta interferência também foi difícil determinar a resistência elétrica correspondente à interface amostra/eletrodo (primeiro ponto em que o arco do espectro de impedância intercepta o eixo das abcissas).

Verificou-se uma maior distinção entre as curvas obtidas nos gráficos  $\log(z)$  x  $\log(f)$  aos 14 dias de cura nas argamassas contaminadas.

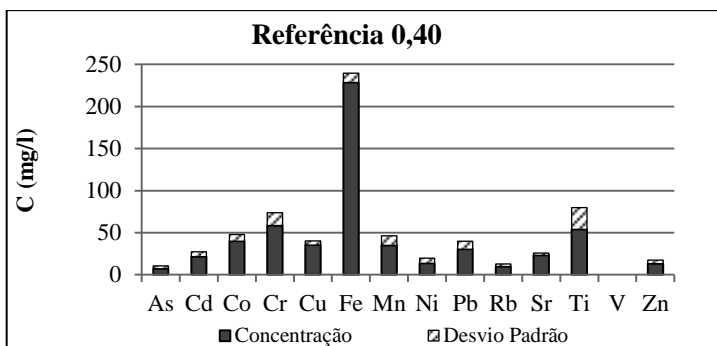
Todas as argamassas contaminadas com cádmio, cromo, chumbo e zinco apresentaram valores de impedância inferiores à argamassa de referência (relação a/c de 0,50) aos 28 dias de cura. Com o aumento no teor de contaminação das argamassas e a idade de cura ocorreu uma menor linearidade das curvas  $\log Z$  x  $\log f$ .

Aos 3 dias de cura, com exceção da argamassa contaminada com 160 ppm de cádmio, todas as argamassas apresentaram resistência elétrica total maior do que a argamassa de referência e com aumento da idade de cura a resistência elétrica destas argamassas aumenta numa

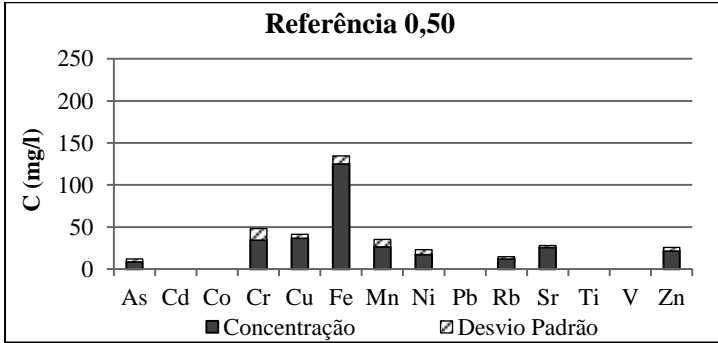
proporção menor do que a argamassa de referência. Os metais pesados podem ter alterado a velocidade de hidratação das argamassas.

#### 4.4 LIXIVIAÇÃO – NBR 10005

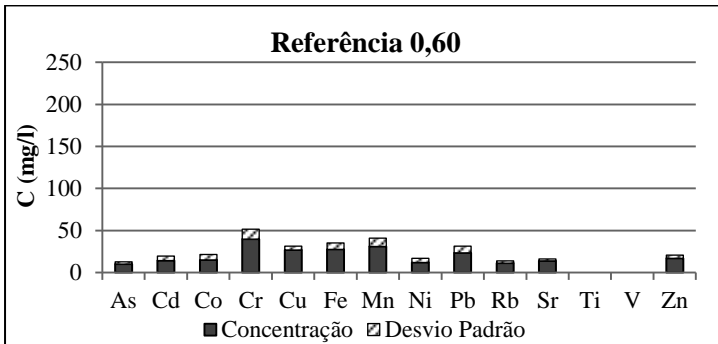
Para o ensaio de lixiviação descrito pela NBR 10005, nas análises do líquido extraído após o ensaio de lixiviação, os elementos químicos encontrados são apresentados nas Figura 94 a Figura 94. Como resultados das análises químicas por energia dispersiva de raios-X, são apresentadas as concentrações dos elementos químicos, identificados durante a incidência do feixe de elétrons na amostra líquida, e o desvio padrão, fornecido pelo equipamento. As argamassas de referência com relação a/c igual a 0,40 e 0,50, apresentaram grande quantidade de ferro liberada neste ensaio de lixiviação. A argamassa de relação a/c igual a 0,60, não apresentou uma grande liberação de ferro, mas, a liberação de todos os outros elementos foi maior do que as amostras de menor relação a/c. Com o aumento da relação a/c, aumentou a porosidade da argamassa e a lixiviação dos elementos químicos.



**Figura 92 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa de referência (a/c = 0,40).**



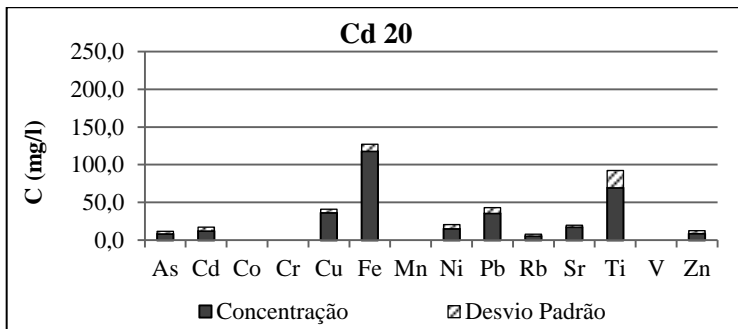
**Figura 93 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa de referência (a/c = 0,50).**



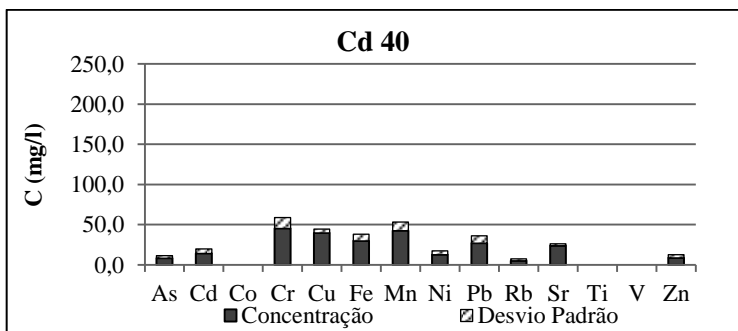
**Figura 94 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa de referência (a/c = 0,60).**

As concentrações lixiviadas, durante este ensaio de lixiviação foram maiores na argamassa de menor relação a/c. No entanto, como o material submetido ao ensaio foi moído em partículas cujo diâmetro era inferior a 9,5 mm, como a granulometria não foi controlada, uma melhor resultaria em partículas mais finas, ocasionando maior lixiviação dos elementos químicos. Para as argamassas contaminadas com cádmio (Figura 95 a Figura 98), o ferro e o cobre foram bastante liberados. O cádmio também é liberado, mas, em quantidades inferiores à quantidade adicionada às argamassas.

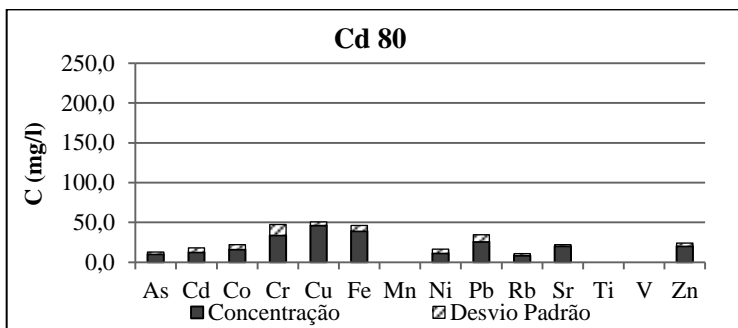




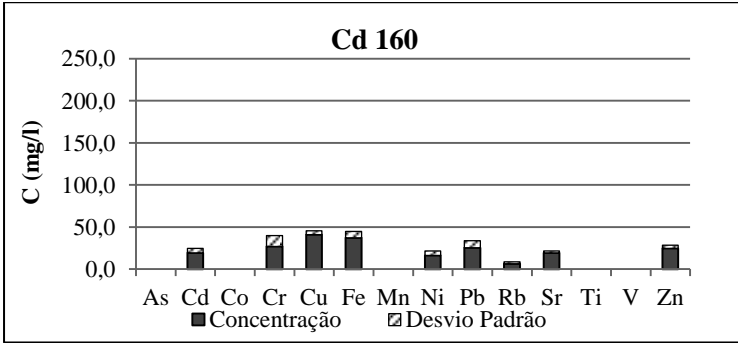
**Figura 95 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 20 ppm de cádmio.**



**Figura 96 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 40 ppm de cádmio.**

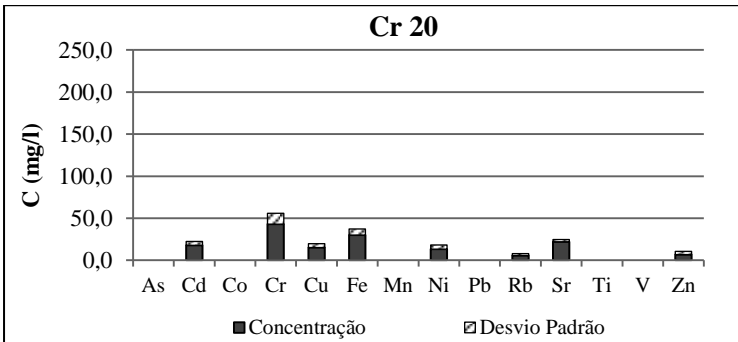


**Figura 97 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 80 ppm de cádmio.**

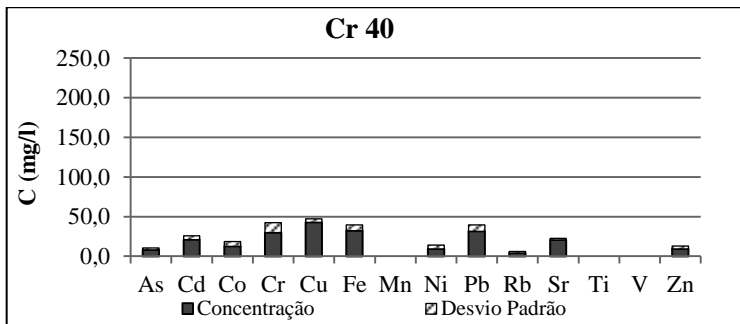


**Figura 98 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 160 ppm de cádmio.**

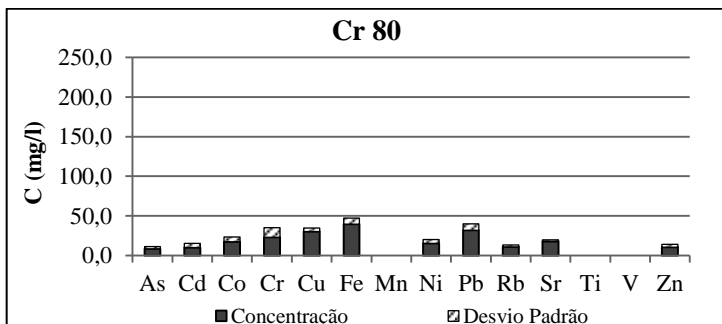
A argamassa contaminada com 20 ppm de cromo, liberou mais cromo do que a quantidade adicionada por meio do nitrato de cromo. No entanto, a quantidade de cromo liberada pela argamassa Cr 20, não foi maior do que a quantidade liberada pela referência (a/c igual a 0,50) mais a quantidade adicionada à argamassa. As demais argamassas contaminadas com 40, 80 e 160 ppm de cromo, liberaram menos cromo do que a quantidade adicionada. Todas estas argamassas continuaram liberando grandes quantidades de cobre e ferro (Figura 99 a Figura 102).



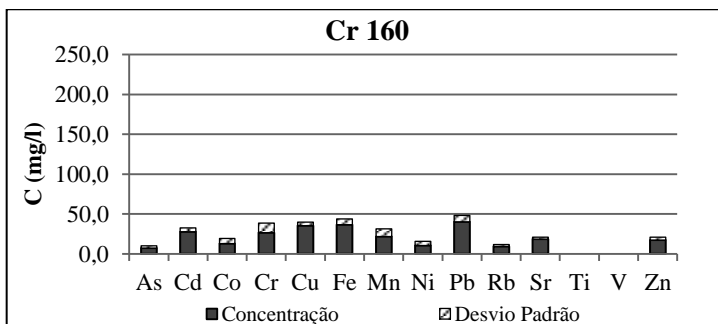
**Figura 99 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 20 ppm de cromo.**



**Figura 100- Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 40 ppm de cromo.**

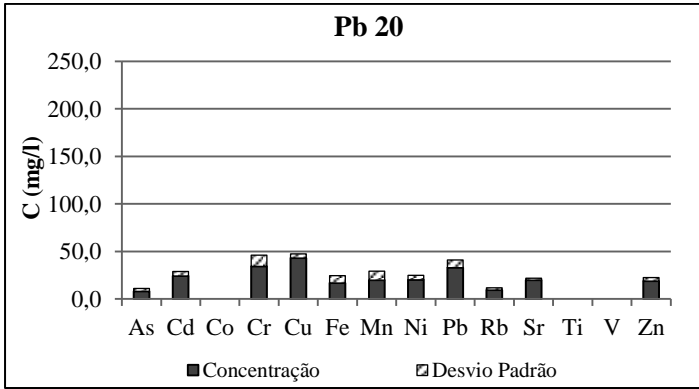


**Figura 101- Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 80 ppm de cromo.**

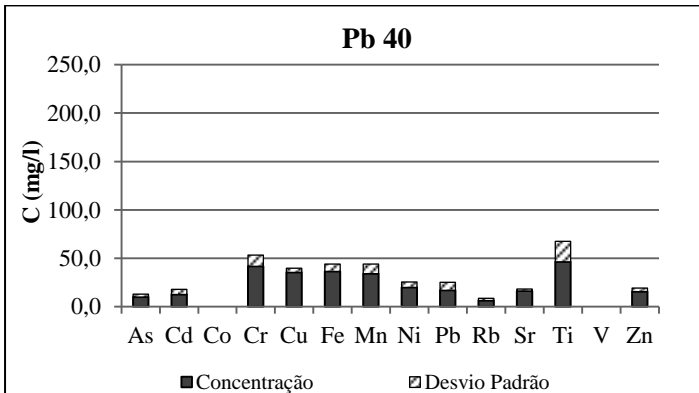


**Figura 102 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 160 ppm de cromo.**

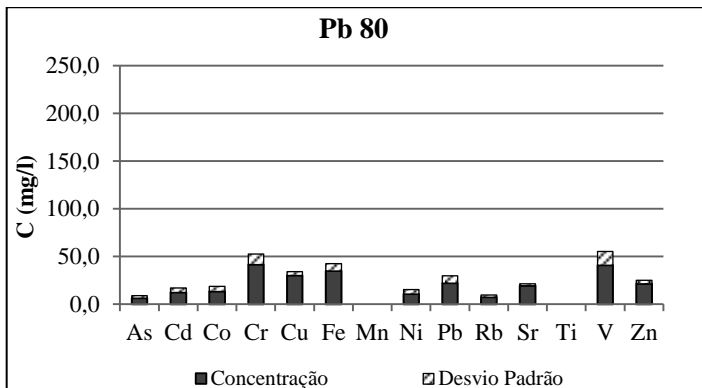
Todas as argamassas contaminadas com chumbo apresentaram menor quantidade liberada de chumbo, do que a quantidade adicionada por meio do nitrato de chumbo, exceto a argamassa contaminada com 20 ppm de chumbo. No entanto, as argamassas de referência liberaram chumbo em quantidades superiores a 20 ppm. Os elementos cobre e ferro também foram bastante liberados nestas amostras (Figura 103 a Figura 106).



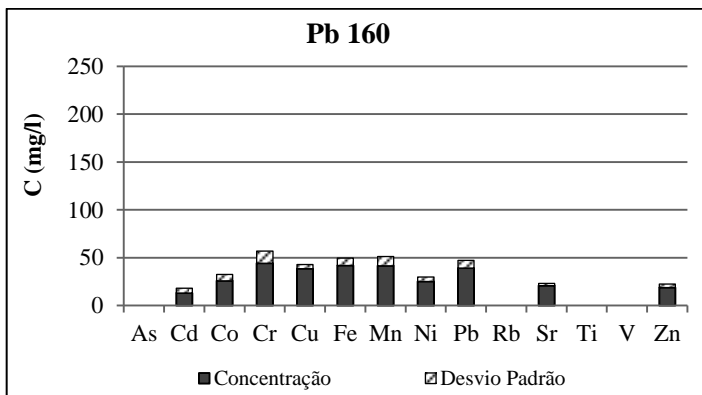
**Figura 103 - Concentrações dos elementos liberados da argamassa contaminada com 20 ppm de chumbo.**



**Figura 104- Concentrações dos elementos liberados da argamassa contaminada com 40 ppm de chumbo.**

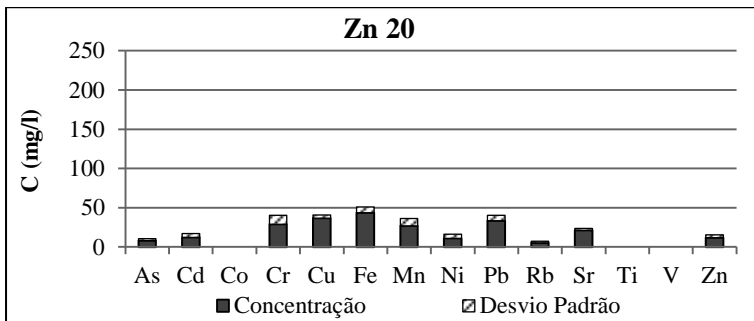


**Figura 105- Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 80 ppm de chumbo.**

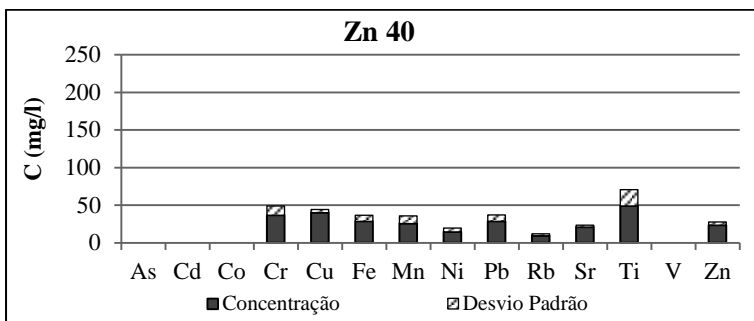


**Figura 106 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 160 ppm de chumbo.**

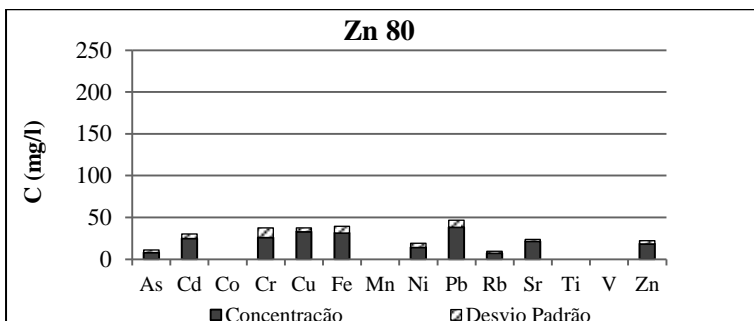
Para todas as argamassas contaminadas com zinco, a quantidade liberada do metal foi menor do que a concentração adicionada às argamassas por meio do nitrato de zinco. E novamente, o cobre e o ferro são liberados de maneira significativa por estas argamassas (Figura 107 a Figura 110).



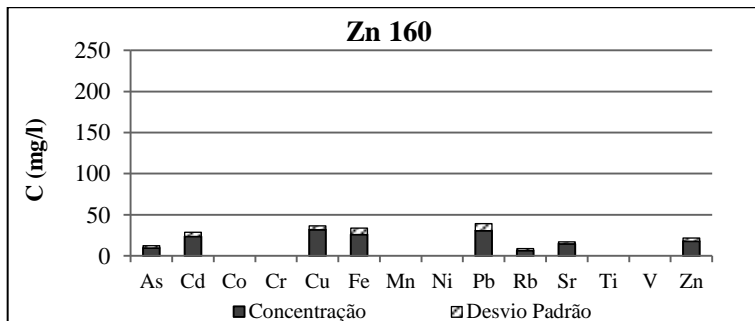
**Figura 107 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 20 ppm de zinco.**



**Figura 108 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 40 ppm de zinco.**

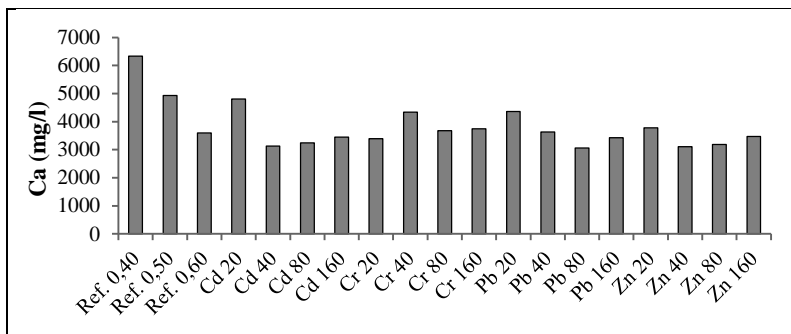


**Figura 109 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 80 ppm de zinco.**



**Figura 110 - Concentrações dos elementos lixiviados da argamassa contaminada com 160 ppm de zinco.**

O elemento cálcio foi bastante liberado durante este ensaio de lixiviação descrito pela NBR 10005. No entanto, a concentração de cálcio liberada não foi apresentada nas tabelas anteriores por ser muito maior do que as concentrações liberadas dos demais elementos químicos. Por este motivo, a liberação do cálcio destas amostras foi apresentada na Figura 111.



**Figura 111 – Concentração de cálcio liberada das argamassas durante ensaio de lixiviação (NBR 10005).**

Como todas as argamassas contaminadas foram produzidas com a mesma relação a/c (0,50), todas estas argamassas liberaram uma quantidade de cálcio inferior à sua respectiva argamassa de referência (de mesma relação a/c).

Após o término do ensaio de lixiviação descrito pela NBR 10005, todo o conjunto (amostra de argamassa triturada e o líquido lixiviante)

foi filtrado e uma alíquota do líquido foi coletada e desta alíquota mediu-se o pH e condutividade elétrica.

Na Tabela 9 são apresentados os valores de pH das amostras líquidas coletadas. De acordo com estes valores de pH foi verificado que o pH resultante de todas as amostras é básico. Em relação às argamassas de referência, como a de maior relação a/c liberou uma menor quantidade cálcio, o pH da solução de extração é um pouco menor. O caráter alcalino das soluções é intimamente ligado à liberação da portlandita das argamassas (hidróxido de cálcio).

**Tabela 9 – pH do líquido lixiviante do ensaio de lixiviação (NBR 10005).**

Amostras	pH	Amostras	pH
Ref. 0,40	11,715	Cr 160	11,835
Ref. 0,50	11,785	Pb 20	11,524
Ref. 0,60	11,561	Pb 40	11,894
Cd 20	11,625	Pb 80	11,768
Cd 40	11,584	Pb 160	11,889
Cd 80	11,473	Zn 20	11,902
Cd 160	11,761	Zn 40	11,945
Cr 20	11,721	Zn 80	11,871
Cr 40	11,862	Zn 160	11,918
Cr 80	11,848		

As condutividades elétricas das amostras líquidas variaram muito pouco e estão apresentadas na Tabela 10.

**Tabela 10 - Condutividade elétrica do líquido lixiviante (NBR 10005).**

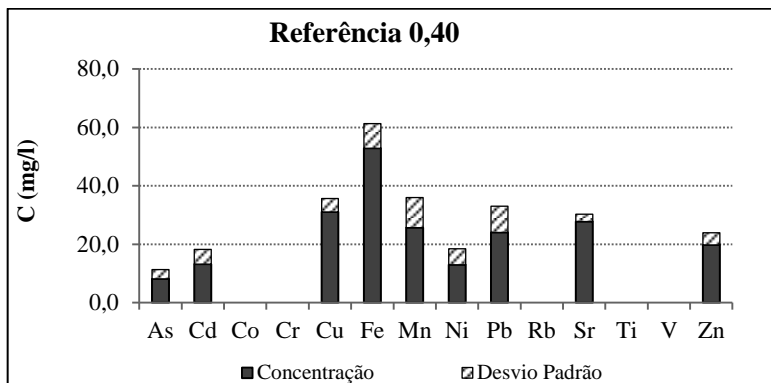
Amostras	$\sigma$ (mS/cm <sup>2</sup> )	Amostras	$\sigma$ (mS/cm <sup>2</sup> )
Ref. 0,40	6,549	Cr 160	6,906
Ref. 0,50	6,860	Pb 20	6,846
Ref. 0,60	6,367	Pb 40	7,118
Cd 20	6,459	Pb 80	7,072
Cd 40	6,529	Pb 160	7,137
Cd 80	6,490	Zn 20	7,152
Cd 160	6,630	Zn 40	7,340
Cr 20	6,514	Zn 80	7,087
Cr 40	7,158	Zn 160	6,920
Cr 80	6,524		

A argamassa Cr 40 liberou uma quantidade significativa de cálcio e com o aumento do hidróxido de cálcio no líquido, maior a condutividade elétrica do mesmo.

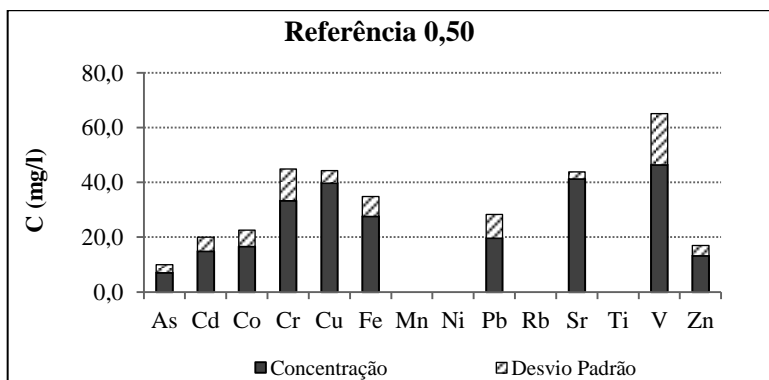


#### 4.5 ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO

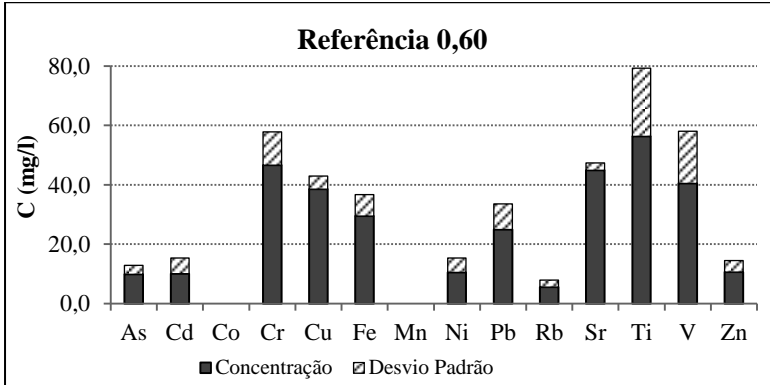
Neste ensaio as argamassas de referência liberaram os metais pesados cádmio, cromo, chumbo e o zinco (exceto a argamassa de relação a/c igual a 0,40 que não liberou cromo) (Figura 112 a Figura 114). Metais como o cobre, ferro e o estrôncio também foram liberados em quantidades significativas.



**Figura 112 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra de referência de relação a/c igual a 0,40.**

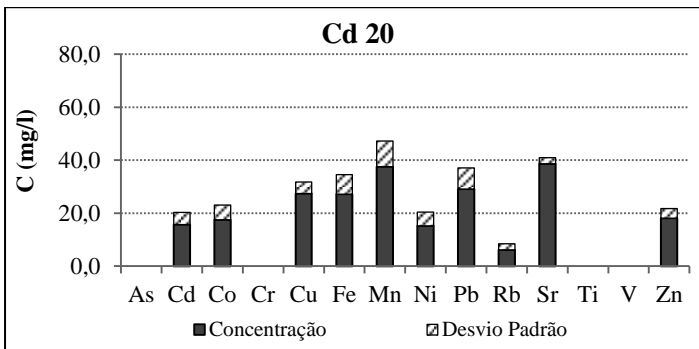


**Figura 113 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra de referência de relação a/c igual a 0,40.**

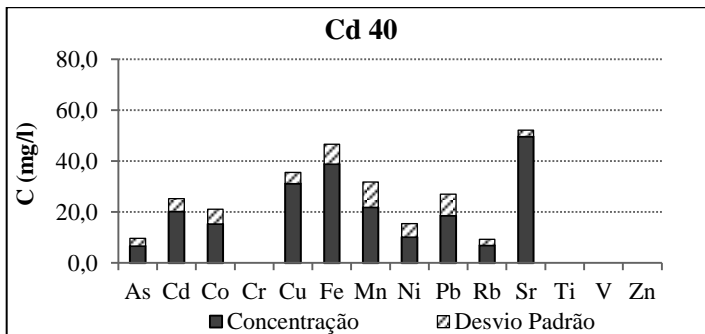


**Figura 114 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra de referência de relação a/c igual a 0,40.**

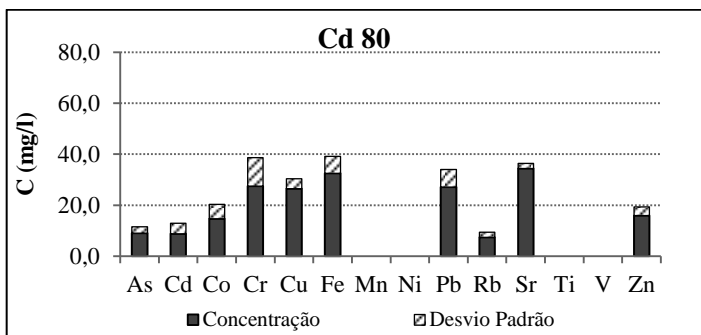
Nas argamassas contaminadas com cádmio, os elementos ferro, cobre e estrôncio continuam sendo liberados de maneira significativa (Figura 115 a Figura 118). O metal pesado cádmio, não foi liberado em quantidade maior do que a quantidade adicionada às argamassas. Em todas as argamassas, a quantidade de cádmio liberada não passou de 20 mg/l (ppm).



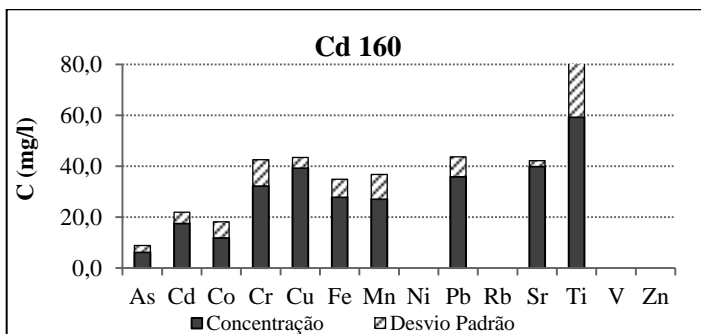
**Figura 115 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 20 ppm de cádmio.**



**Figura 116 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 40 ppm de cádmio.**

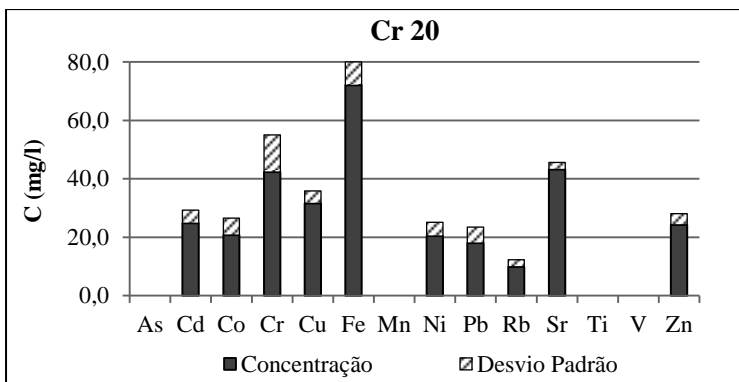


**Figura 117 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 80 ppm de cádmio.**

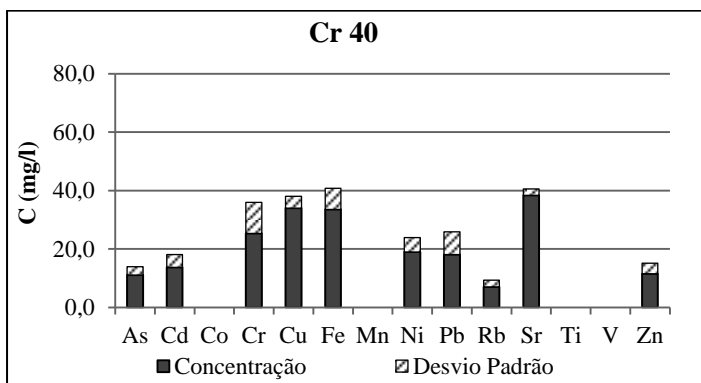


**Figura 118 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 160 ppm de cádmio.**

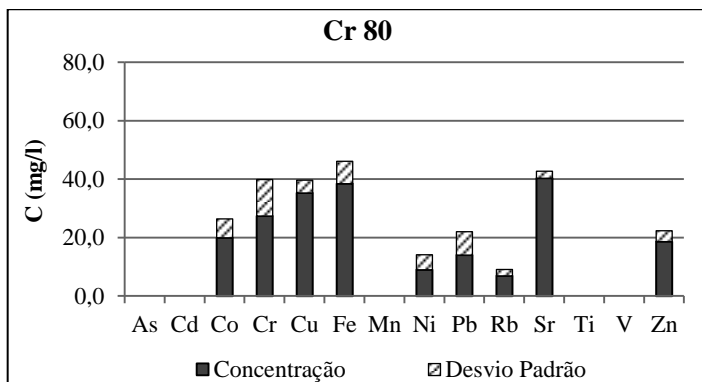
As argamassas contaminadas com 40, 80 e 160 ppm de cromo, não liberaram mais cromo do que a quantidade que foi adicionada por meio do nitrato de cromo (Figura 119 a Figura 122). Na amostra contaminada com 20 ppm de cromo, mais que o dobro da quantidade de cromo adicionada à argamassa foi liberada. No entanto, esta quantidade de cromo não ultrapassou a soma da quantidade de cromo encontrada na argamassa de referência (a/c igual a 0,50) e a adicionada nesta argamassa.



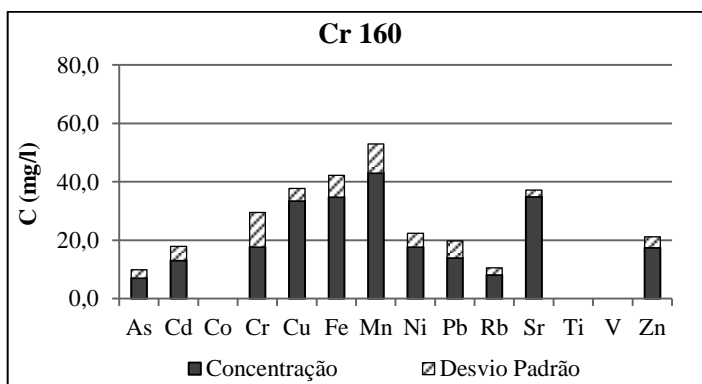
**Figura 119 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 20 ppm de cromo.**



**Figura 120 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 40 ppm de cromo.**



**Figura 121 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 80 ppm de cromo.**



**Figura 122 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 160 ppm de cromo.**

Na argamassa contaminada com 20 ppm de chumbo destacou-se a liberação de ferro que passou de 300 ppm. As demais amostras liberaram quantidades significativas de ferro, no entanto, estas quantidades não passavam de 80 ppm. Em relação ao metal chumbo, nenhuma amostra liberou quantidade maior do que a adicionada às argamassas. Todas estas argamassas também liberaram quantidades significativas de cobre e estrôncio (Figura 123 a Figura 126).

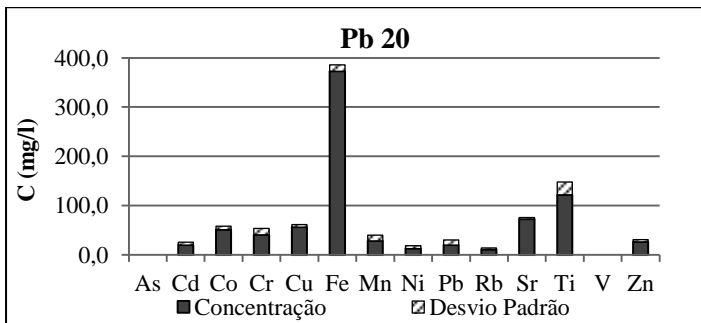


Figura 123 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 20 ppm de chumbo.

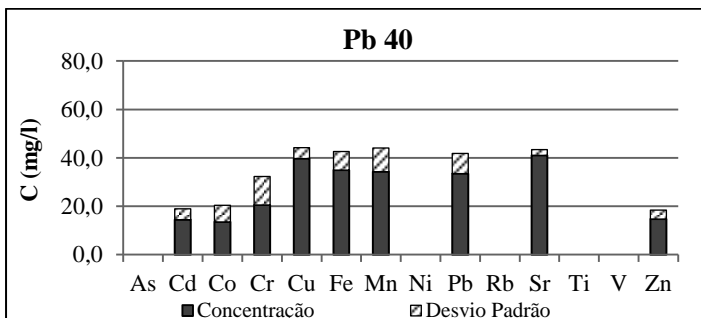


Figura 124 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 40 ppm de chumbo.

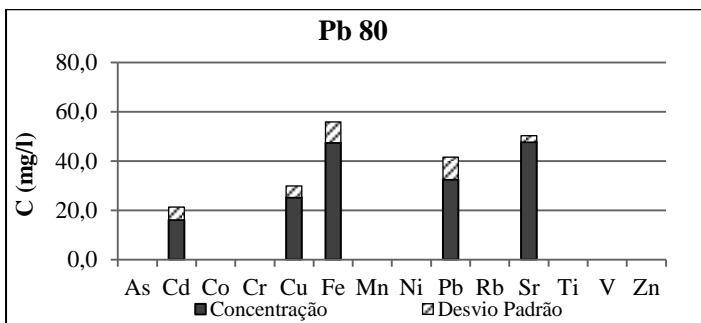
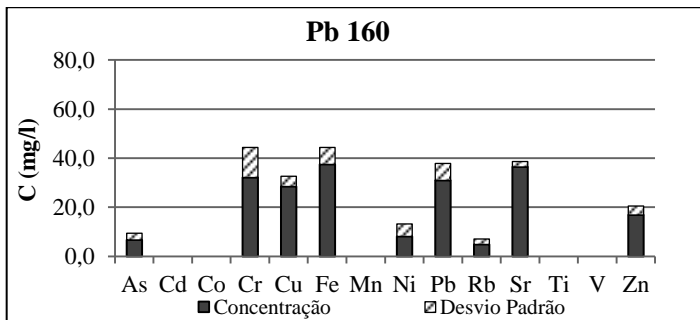
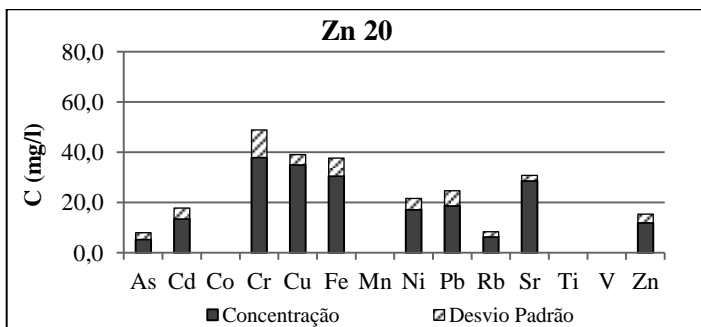


Figura 125 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 80 ppm de chumbo.



**Figura 126 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 160 ppm de chumbo.**

As argamassas contaminadas com zinco liberaram cobre, ferro e estrôncio em maiores quantidades e a liberação de zinco não passou de 20 ppm em todas as amostras (Figura 127 a Figura 130). O cromo foi liberado em maior quantidade na argamassa contaminada com 20 e 160 ppm de zinco. E uma pequena parcela do elemento rubídio foi liberada em todas as argamassas contaminadas com zinco.



**Figura 127 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 20 ppm de zinco.**

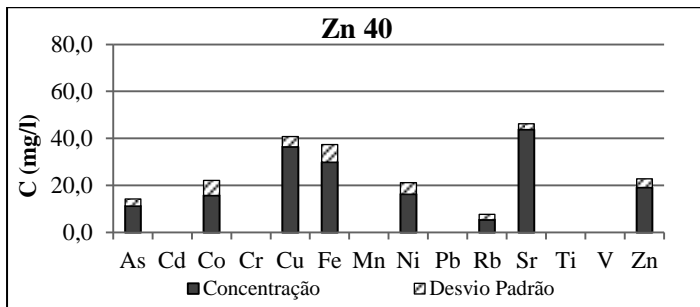


Figura 128 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 40 ppm de zinco.

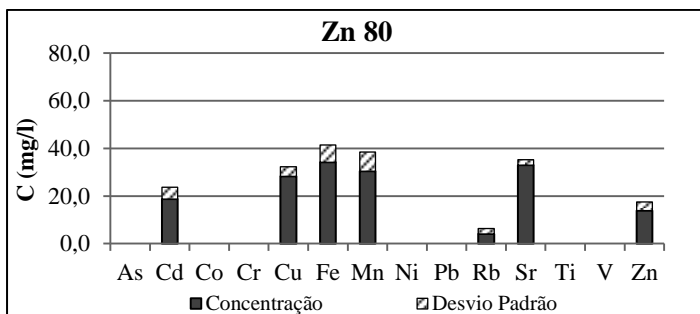


Figura 129 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 80 ppm de zinco.

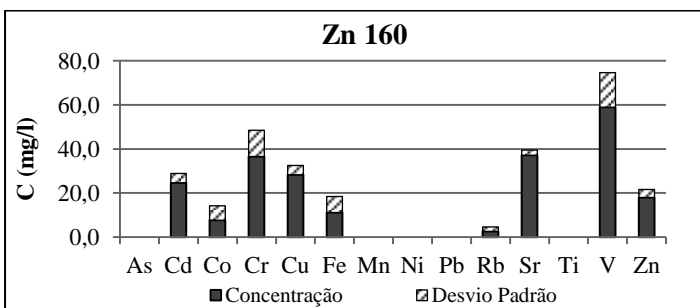
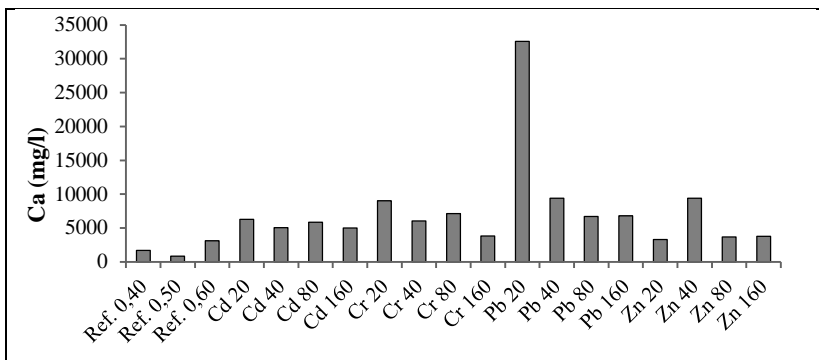


Figura 130 - Concentração dos elementos solubilizados da amostra contaminada com 160 ppm de zinco.



Nas liberações de cálcio decorrente do ensaio de solubilização, a amostra contaminada com 20 ppm de chumbo liberou quantidade muito maior do que as demais amostras. A argamassa de referência de maior relação a/c foi a amostra que liberou mais cálcio (Figura 131).



**Figura 131 – Quantidade de cálcio liberada das argamassas submetidas ao ensaio de solubilização.**

A diferença entre o ensaio de solubilização e o de lixiviação descrito na NBR 10005, é que no ensaio de solubilização, o pH da solução de extração é neutro, o tempo de contato entre a amostra e o líquido é maior e não ocorre a agitação da solução. O pH das amostras líquidas coletadas após o ensaio de solubilização foi maior do que os valores obtidos para o ensaio de lixiviação descrito pela NBR 10005. Estes valores mais básicos de pH são decorrentes das maiores quantidades de cálcio liberadas das argamassas. No entanto, os valores de pH, dispostos na Tabela 11, continuam sendo de caráter básico e não apresentaram variações significativas.

**Tabela 11 - pH das amostras líquidas após o ensaio de solubilização.**

Amostras	pH	Amostras	pH
Ref. 0,40	12,443	Cr 160	12,672
Ref. 0,50	12,594	Pb 20	12,524
Ref. 0,60	12,434	Pb 40	12,509
Cd 20	12,451	Pb 80	12,527
Cd 40	12,502	Pb 160	12,670
Cd 80	12,446	Zn 20	12,549
Cd 160	12,443	Zn 40	12,509
Cr 20	12,501	Zn 80	12,588
Cr 40	12,475	Zn 160	12,459
Cr 80	12,481		

Na Tabela 12 encontram-se os valores de condutividade elétrica das amostras líquidas, coletadas após o ensaio de solubilização. A argamassa de referência e relação a/c igual a 0,40 apresentou a menor condutividade elétrica. Esta amostra também liberou a menor quantidade de elementos químicos para a água destilada. Em geral, a condutividade elétrica variou de 4 a 8 mS/cm<sup>2</sup>.

**Tabela 12 - Condutividade elétrica das amostras líquidas após o ensaio de solubilização.**

Amostras	$\sigma$ (mS/cm <sup>2</sup> )	Amostras	$\sigma$ (mS/cm <sup>2</sup> )
Ref. 0,40	4,754	Cr 160	6,519
Ref. 0,50	5,468	Pb 20	6,274
Ref. 0,60	6,688	Pb 40	7,410
Cd 20	6,950	Pb 80	6,105
Cd 40	5,922	Pb 160	7,573
Cd 80	6,896	Zn 20	7,174
Cd 160	6,997	Zn 40	6,470
Cr 20	6,255	Zn 80	5,618
Cr 40	6,980	Zn 160	7,006
Cr 80	6,610		

#### 4.6 ENSAIO DE TANQUE

Por meio do ensaio de tanque foi possível verificar a liberação dos metais contaminantes: cádmio, cromo, chumbo e zinco, além de outros elementos químicos, cujos resultados foram apresentados na seção dos apêndices (APÊNDICE 1 - Tabelas com as concentrações de todos os elementos químicos liberados durante o ensaio de tanque.).

Os valores de pH de todas as amostras líquidas coletadas ao longo dos 64 dias apresentaram o mesmo perfil de comportamento. O pH das amostras variou um pouco no início do ensaio. Durante os nove dias até os 36 dias de imersão o pH subiu e após os 36 dias até o final do ensaio, aos 64 dias, o pH das amostras diminuiu bastante. Um dos elementos que determinam o carácter básico das amostras líquidas é o hidróxido de cálcio, liberado após a hidratação do cimento Portland. Se a liberação de cálcio vai diminuindo com o tempo de ensaio, o pH das amostras tende a diminuir. Os gráfico da variação do pH em relação ao tempo estão apresentadas na seção APÊNDICE 5 – pH durante o ensaio de tanque.

Os mecanismos de lixiviação foram calculados para todos os elementos liberados das argamassas durante o ensaio de tanque (APÊNDICE 4 – Mecanismos de lixiviação).

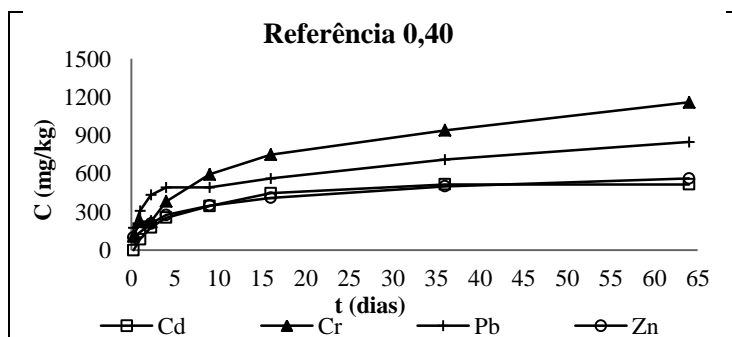
Os três critérios avaliados para a determinação dos mecanismos de lixiviação foram a inclinação da reta ( $rc$ ) num gráfico logaritmo do tempo (h) versus a liberação do elemento ( $mg/m^2$ ), o  $R^2$  ( $sd$ ) desta reta e um fator de concentração do elemento ( $CF$ ). As tabelas dos mecanismos de lixiviação se encontram nos apêndices. A avaliação realizada pelo critério do  $R^2$  ( $sd$ ) classificou quase todos os mecanismos de lixiviação como não controlados por difusão (MNCD). Somente alguns elementos químicos como o manganês, o vanádio, o níquel e cromo apresentaram mecanismo de lixiviação regido pela difusão.

Considerando o critério  $rc$ , no início do ensaio de tanque (até a quinta extração) ocorreu difusão. No final do ensaio, obteve-se esgotamento ou dissolução dos elementos químicos.

Na norma NEN 7375, o mecanismo de lixiviação é aceito como sendo difusão, somente se a difusão for encontrada nos três critérios avaliados. Isto não ocorreu para nenhum elemento químico. Todavia, como houve transporte de massa entre as amostras sólidas e a água contida nos tanques, os coeficientes de difusão dos elementos foram calculados para a avaliação da cinética de liberação dos metais pesados adicionados às argamassas.

#### 4.6.1 Argamassas de referência

Assim como ocorreu no ensaio de lixiviação descrito pela NBR 10005, no ensaio de tanque, as argamassas de referência liberaram quantidades significativas de cromo e chumbo (Figura 132). Os metais cádmio e zinco também foram liberados, mas, em quantidades menores.



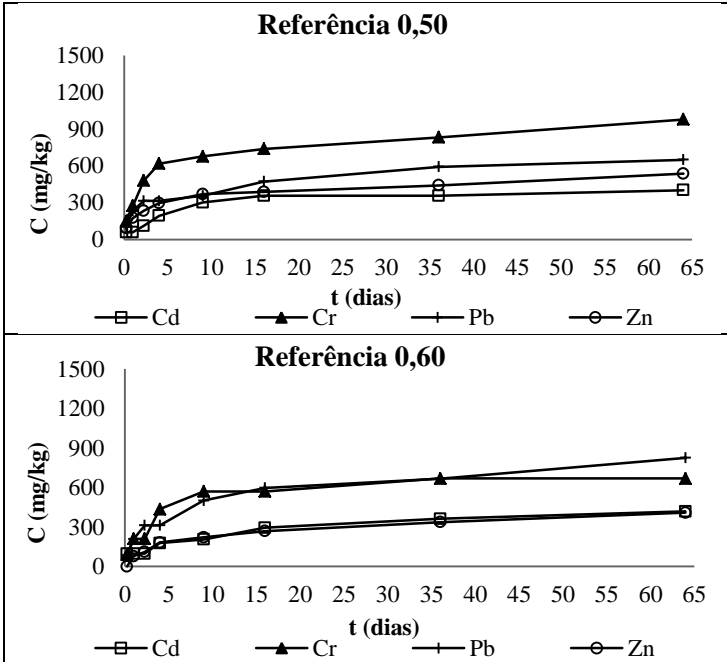


Figura 132 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque das argamassas de referência.

No ensaio de tanque, conforme aumentou a relação a/c das argamassas de referência, aumentou a concentração de cálcio liberada (Figura 133). Na maior relação a/c as porosidades das argamassas são maiores e a liberação de cálcio é maior.

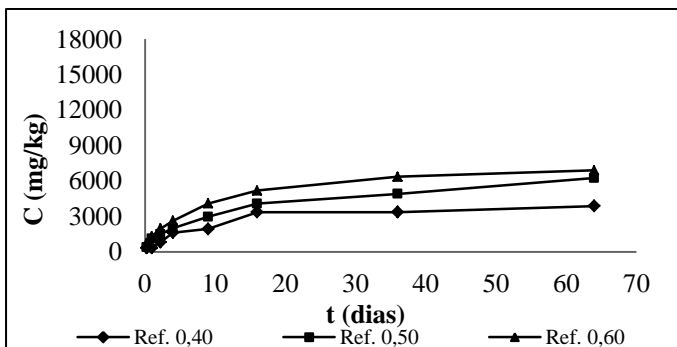
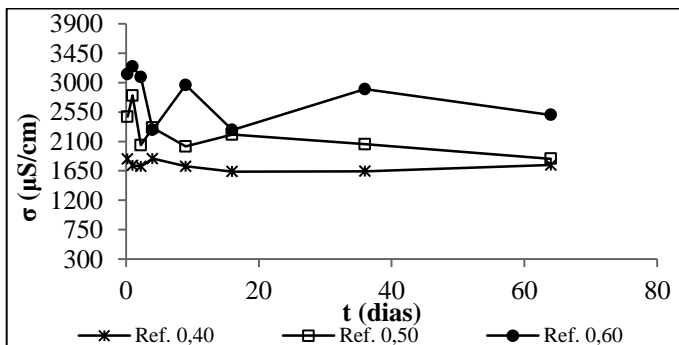


Figura 133 - Liberação de cálcio nas argamassas de referência.

A condutividade elétrica do líquido extraído dos tanques, pouco variou na argamassa de menor relação a/c. Como a liberação de cálcio foi menor nesta argamassa, houve uma menor concentração de íons livres nas amostras líquidas e a condutividade foi menor (Figura 134).



**Figura 134 - Condutividade elétrica das amostras líquidas (argamassas de referência).**

Além da condutividade elétrica medidas das amostras líquidas, foram obtidas as impedâncias elétricas das argamassas durante as extrações. Três medidas de impedância foram coletadas, nas frequências de 200 kHz (baixa frequência = B), 1 MHz (média frequência = M) e 1,5 MHz (alta frequência = A). Não foram realizadas mais medidas para não influenciar no tempo em que as amostras ficariam fora dos tanques, evitando interferências no tempo de lixiviação das argamassas.

Os valores de impedância ao longo dos 64 dias do ensaio de tanque estão apresentados nas Figura 135 a Figura 137 - Impedância elétrica da Ref. 0,60 durante o ensaio de tanque.. Entre as argamassas de referência, com o aumento da relação a/c, aumentou a porosidade e a quantidade de água absorvida durante o ensaio de lixiviação. Logo, a impedância elétrica das argamassas diminuiu. No início do ensaio a impedância elétrica variou porque ocorreu a saída dos elementos químicos e a entrada da água nas argamassas. Tais fenômenos influenciam de maneira distinta na impedância elétrica. A lixiviação dos elementos químicos aumenta a impedância elétrica, devido à saída dos íons que auxiliam na condução da corrente elétrica. A água, por sua natureza condutiva, uma vez absorvida pela amostra, facilita a condução da corrente elétrica. Após os 16 dias, a absorção de água é menor do que

nos períodos anteriores e a presença ou ausência dos elementos químicos que interferem na impedância elétrica. Na baixa frequência, a impedância elétrica variou mais em relação ao tempo. Na média e na alta frequência, a impedância variou em menor intensidade, mas o seu comportamento em relação ao tempo foi o mesmo.

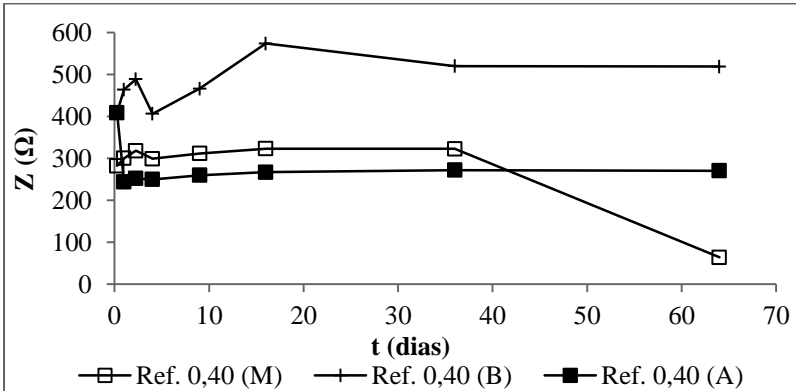


Figura 135 - Impedância elétrica da Ref. 0,40 durante o ensaio de tanque.

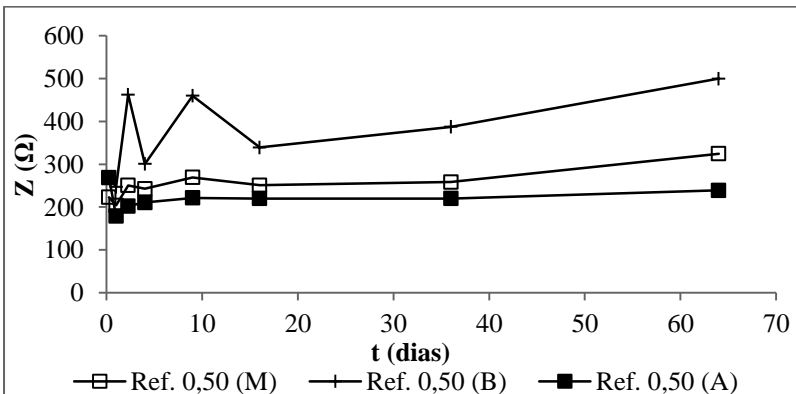
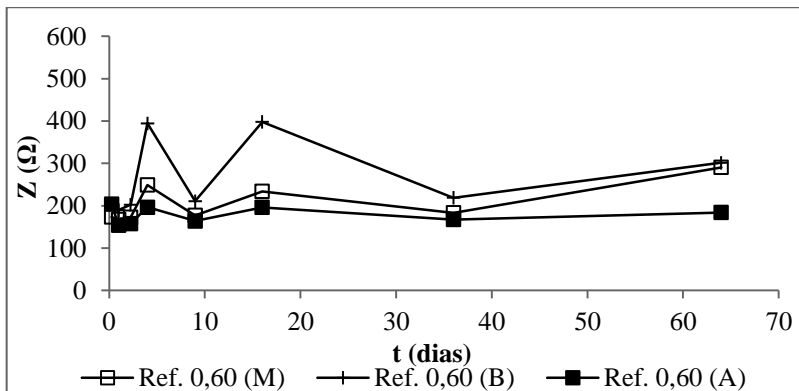


Figura 136 - Impedância elétrica da Ref. 0,50 durante o ensaio de tanque



**Figura 137 - Impedância elétrica da Ref. 0,60 durante o ensaio de tanque.**

A liberação dos elementos químicos é muito alta até a quarta extração (4 dias de imersão). A partir da quarta extração, há um decréscimo na liberação dos elementos químicos, ocasionando uma diminuição brusca da condutividade elétrica do líquido e um aumento na impedância elétrica. Se os metais lixiviam da argamassa, o espaço preenchido por estes metais passa a ser preenchido por água e esta maior quantidade de água diminuiu a resistência elétrica do material monolítico, que por sua vez diminui a impedância. Esta diminuição da impedância pode ser verificada no início do ensaio de tanque.

Em relação às difusividades, a argamassa de referência com relação a/c igual a 0,50, não liberou o cádmio e o chumbo no ensaio descrito pela NBR 10005 (Tabela 13). Portanto, não foi calculado o coeficiente de difusão considerando a liberação de cádmio e chumbo neste ensaio de lixiviação.

As taxas de mobilidade dos elementos químicos nas argamassas de referência (Tabela 13) deram como altas e nas pastilhas os elementos cádmio e zinco apresentaram média mobilidade. Estes foram os metais que foram liberados em menores quantidades em relação à liberação do cromo e do chumbo, durante o ensaio de tanque.

**Tabela 13 - Taxa de mobilidade das argamassas de referência.**

Ref. 0,40												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	2,07E-11	10,68	<b>Alta</b>	2,06E-11	10,69	<b>Alta</b>	7,27E-12	11,14	<b>Média</b>	1,37E-09	8,86	<b>Alta</b>
Cr	2,16E-11	10,66	<b>Alta</b>	1,40E-11	10,85	<b>Alta</b>	1,83E-11	10,74	<b>Alta</b>	-	-	-
Pb	2,03E-11	10,69	<b>Alta</b>	2,81E-11	10,55	<b>Alta</b>	2,55E-11	10,59	<b>Alta</b>	1,11E-09	8,96	<b>Alta</b>
Zn	1,79E-11	10,75	<b>Alta</b>	6,64E-11	10,18	<b>Alta</b>	6,65E-11	10,18	<b>Alta</b>	7,20E-10	9,14	<b>Alta</b>
Ref. 0,50												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	1,83E-11	10,74	<b>Alta</b>	-	-	<b>Baixa</b>	6,38E-12	11,20	<b>Média</b>	6,45E-10	9,19	<b>Alta</b>
Cr	1,98E-11	10,70	<b>Alta</b>	2,81E-11	10,55	<b>Alta</b>	1,59E-11	10,80	<b>Alta</b>	7,66E-10	9,12	<b>Alta</b>
Pb	1,73E-11	10,76	<b>Alta</b>	-	-	<b>Baixa</b>	5,93E-11	10,23	<b>Alta</b>	9,69E-10	9,01	<b>Alta</b>
Zn	2,11E-11	10,68	<b>Alta</b>	2,12E-11	10,67	<b>Alta</b>	1,22E-11	10,91	<b>Alta</b>	1,44E-09	8,84	<b>Alta</b>
Ref. 0,60												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	1,93E-11	10,71	<b>Alta</b>	3,12E-11	10,51	<b>Alta</b>	1,27E-11	10,90	<b>Alta</b>	1,51E-09	8,82	<b>Alta</b>
Cr	1,45E-11	10,84	<b>Alta</b>	1,00E-11	11,00	<b>Alta</b>	1,41E-11	10,85	<b>Alta</b>	1,82E-10	9,74	<b>Alta</b>
Pb	2,21E-11	10,66	<b>Alta</b>	4,51E-11	10,35	<b>Alta</b>	1,97E-11	10,71	<b>Alta</b>	9,63E-10	9,02	<b>Alta</b>
Zn	2,12E-11	10,67	<b>Alta</b>	2,12E-11	10,67	<b>Alta</b>	3,76E-12	11,43	<b>Média</b>	1,29E-09	8,89	<b>Alta</b>

Como a liberação dos elementos químicos foi maior no ensaio de solubilização, a difusão encontrada neste ensaio também foi maior.

#### 4.6.2 Cádmiio

Nas argamassas contaminadas com cádmio (Figura 141 a Figura 141), a amostra com o menor teor de contaminação foi a que liberou mais cádmio ao longo dos 64 dias de ensaio de lixiviação nos tanques. Nas concentrações de 40, 80 e 160 ppm de cádmio, a liberação final deste metal foi praticamente a mesma. As liberações de cádmio foram maiores até os 16 dias de extração e após este período foram muito pequenas em relação às concentrações liberadas no início do ensaio, refletindo em curvas quase constantes. No entanto, alguns elementos como o chumbo e o cromo, nestas argamassas contaminadas com cádmio, não apresentaram curvas constantes a partir dos 16 dias, estas curvas continuam ascendentes e se destacam das demais curvas (Cd 40 e Cd 160). Quando a curva de liberação dos elementos químicos não se torna constante, significa que ainda há quantidades do elemento a ser liberada do material monolítico, se ocorresse a continuação do ensaio de tanque.



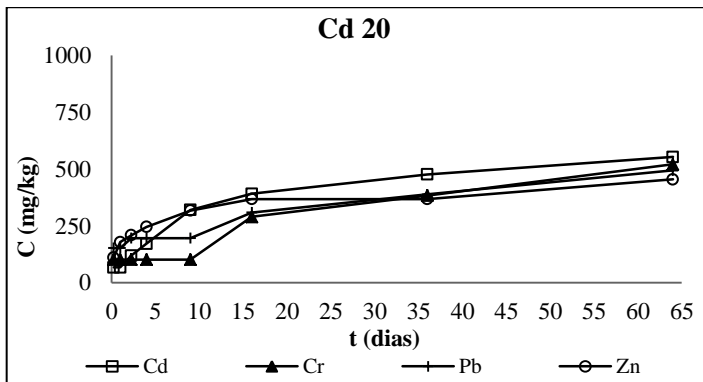


Figura 138 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 20 ppm de cádmio.

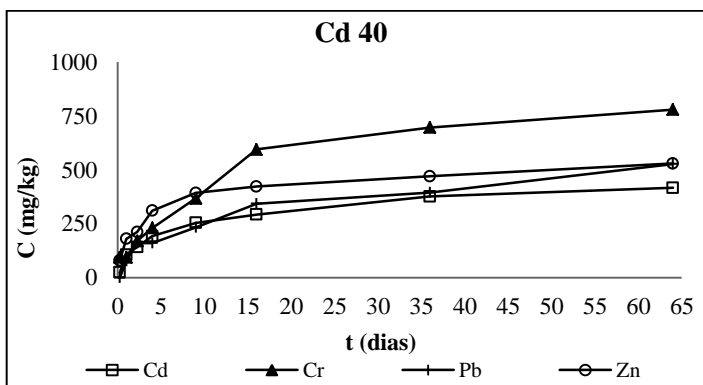


Figura 139 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 40 ppm de cádmio.

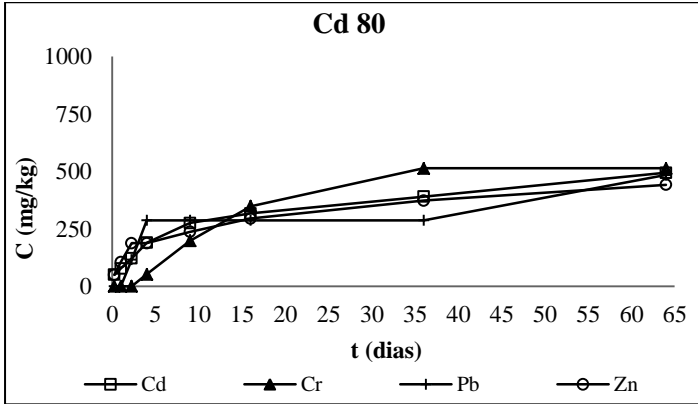


Figura 140 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 80 ppm de cádmio.

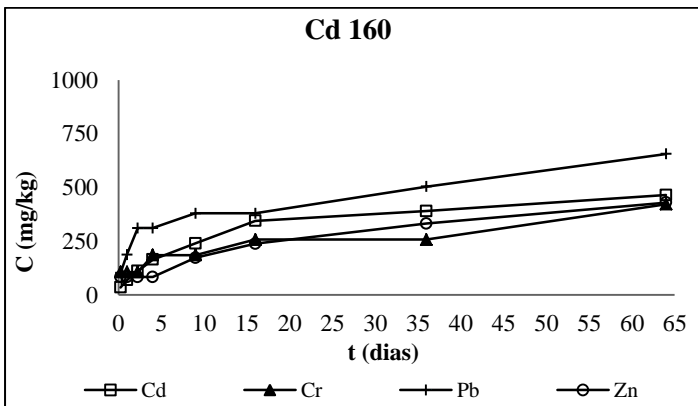
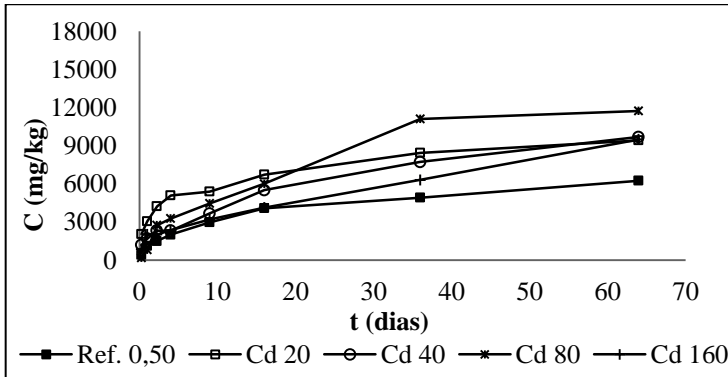


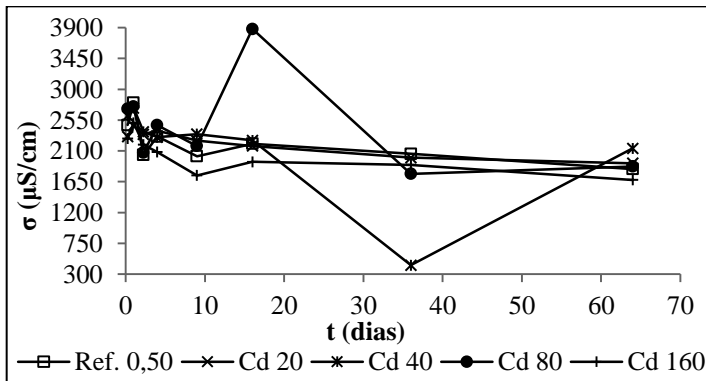
Figura 141 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 160 ppm de cádmio.

A concentração final liberada de cálcio das argamassas contaminadas com 20, 40 e 160 ppm de cádmio foi praticamente a mesma (Figura 142). Todas as argamassas contaminadas apresentaram uma quantidade de cálcio liberada maior do que a argamassa de referência (a/c igual a 0,50).



**Figura 142 - Liberação de cálcio nas argamassas contaminadas com cádmio.**

As condutividades elétricas das amostras líquidas das argamassas contaminadas com cádmio diminuíram ao longo do tempo durante o ensaio de tanque (Figura 143).



**Figura 143 - Condutividade elétrica das amostras líquidas (argamassas contaminadas com cádmio).**

As argamassas contaminadas com cádmio apresentaram um aumento da impedância elétrica ao longo dos 64 dias do ensaio de tanque nas argamassas Cd 20 e Cd 160 (Figura 144 a Figura 147). A argamassa contaminada com 160 ppm de cádmio apresentou a maior impedância elétrica. E a impedância obtida na baixa frequência é que melhor caracterizou as argamassas contaminadas durante o ensaio de tanque.

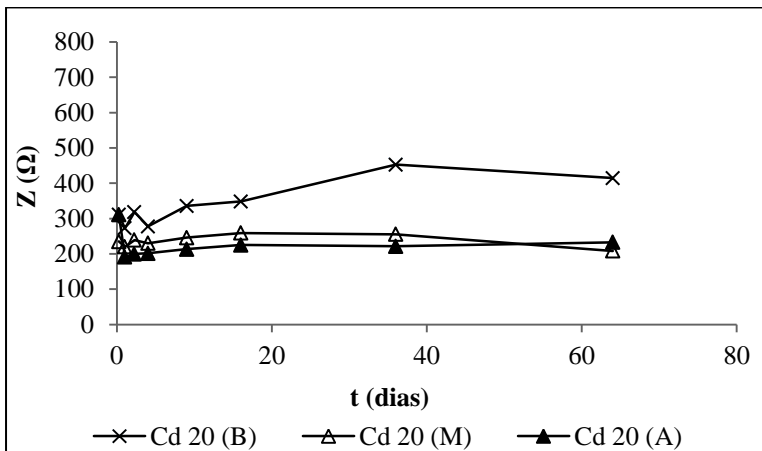


Figura 144 - Impedância elétrica da argamassa Cd 20 durante o ensaio de tanque.

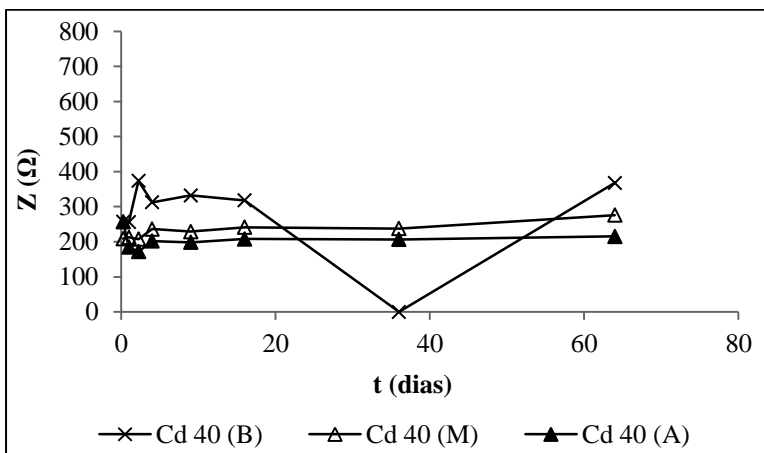


Figura 145 - Impedância elétrica da argamassa Cd 40 durante o ensaio de tanque.

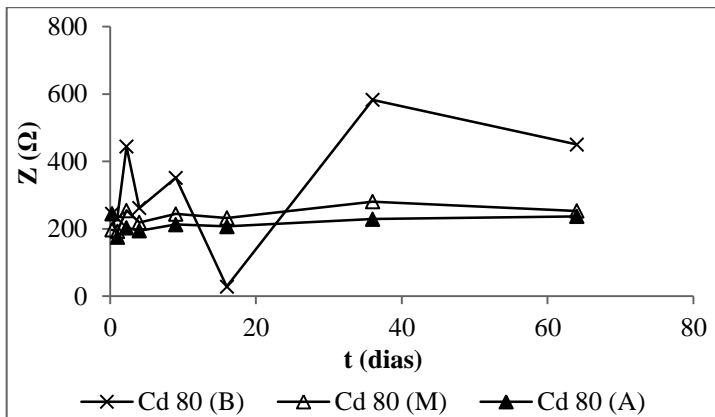


Figura 146 - Impedância elétrica da argamassa Cd 80 durante o ensaio de tanque.

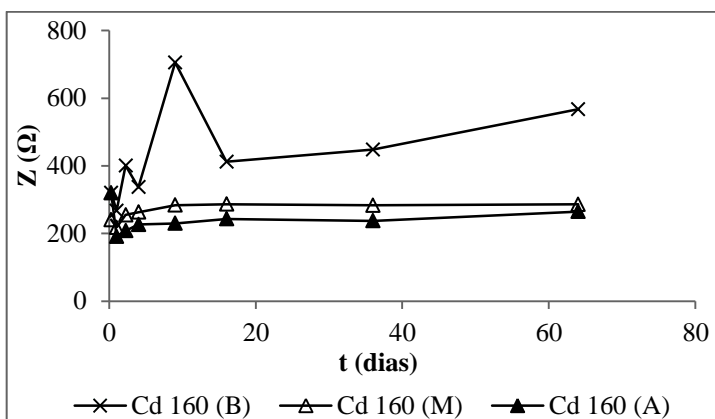


Figura 147 - Impedância elétrica da argamassa Cd 160 durante o ensaio de tanque.

Em todas as argamassas contaminadas com cádmio a difusividade encontrada a partir da NBR 10005 foi maior do que as difusividades encontradas a partir das pastilhas e do ensaio de tanque. No caso da argamassa contaminada com 160 ppm de cádmio, as difusividades encontradas a partir da NBR 10005 e do ensaio de tanque.

Nas argamassas contaminadas com cádmio, o elemento cádmio apresentou alta mobilidade em todas as argamassas e em todos os

ensaios, exceto nas pastilhas, onde apresentou média mobilidade (Tabela 14).

Os demais metais pesados cromo, chumbo e zinco, não foram analisados nas pastilhas referentes as argamassas contaminadas com cádmio e por este motivo os coeficientes de difusão destes metais não aparece nas pastilhas.

**Tabela 14 - Taxa de mobilidade das argamassas contaminadas com cádmio.**

Cd 20												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	1,95E-11	10,71	<b>Alta</b>	7,19E-11	10,14	<b>Alta</b>	4,26E-12	11,37	<b>Média</b>	1,09E-09	8,96	<b>Alta</b>
Cr	2,65E-11	10,58	<b>Alta</b>	-	-	<b>Baixa</b>	-	-	-	-	-	<b>Baixa</b>
Pb	2,34E-11	10,63	<b>Alta</b>	6,83E-12	11,17	<b>Média</b>	-	-	-	2,56E-10	9,59	<b>Alta</b>
Zn	2,21E-11	10,66	<b>Alta</b>	9,13E-11	10,04	<b>Alta</b>	-	-	-	5,59E-10	9,25	<b>Alta</b>
Cd 40												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	1,75E-11	10,76	<b>Alta</b>	3,08E-11	10,51	<b>Alta</b>	8,71E-12	11,06	<b>Média</b>	3,75E-10	9,43	<b>Alta</b>
Cr	1,79E-11	10,75	<b>Alta</b>	1,05E-11	10,98	<b>Alta</b>	-	-	-	-	-	<b>Baixa</b>
Pb	2,55E-11	10,59	<b>Alta</b>	1,34E-11	10,87	<b>Alta</b>	-	-	-	7,10E-10	9,15	<b>Alta</b>
Zn	1,81E-11	10,74	<b>Alta</b>	1,29E-10	9,89	<b>Alta</b>	-	-	-	-	-	<b>Baixa</b>
Cd 80												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	2,34E-11	10,63	<b>Alta</b>	5,57E-11	10,25	<b>Alta</b>	3,06E-12	11,51	<b>Média</b>	2,84E-09	8,55	<b>Alta</b>
Cr	1,46E-11	10,84	<b>Alta</b>	8,18E-12	11,09	<b>Média</b>	-	-	<b>Baixa</b>	3,10E-10	9,51	<b>Alta</b>
Pb	4,17E-11	10,38	<b>Alta</b>	1,27E-11	10,90	<b>Alta</b>	-	-	<b>Baixa</b>	2,85E-10	9,55	<b>Alta</b>
Zn	2,05E-11	10,69	<b>Alta</b>	1,72E-11	10,76	<b>Alta</b>	-	-	<b>Baixa</b>	6,84E-10	9,17	<b>Alta</b>
Cd 160												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	2,07E-11	10,68	<b>Alta</b>	2,03E-11	10,69	<b>Alta</b>	1,66E-12	11,78	<b>Média</b>	6,26E-10	9,20	<b>Alta</b>
Cr	3,91E-11	10,41	<b>Alta</b>	8,75E-12	11,06	<b>Média</b>	-	-	-	1,53E-10	9,82	<b>Alta</b>
Pb	2,47E-11	10,61	<b>Alta</b>	2,36E-11	10,63	<b>Alta</b>	-	-	-	2,98E-10	9,53	<b>Alta</b>
Zn	2,43E-11	10,61	<b>Alta</b>	1,08E-11	10,97	<b>Alta</b>	-	-	-	-	-	-

#### 4.6.3 Cromo

Nas argamassas contaminadas com cromo (Figura 148 a Figura 151), conforme aumentou o teor de contaminação, diminuiu a concentração total de cromo liberada ao longo dos 64 dias do ensaio de tanque. Estas argamassas liberaram maior quantidade de cromo e em seguida, o metal mais liberado foi o chumbo. Ambos os metais também foram liberados pelas argamassas de referência em maiores quantidades.

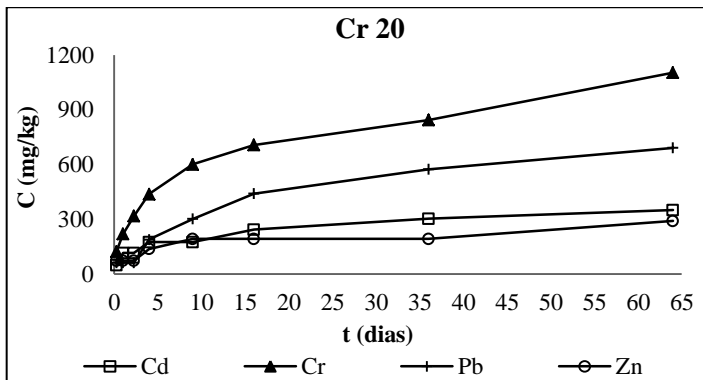


Figura 148 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 20 ppm de cromo.

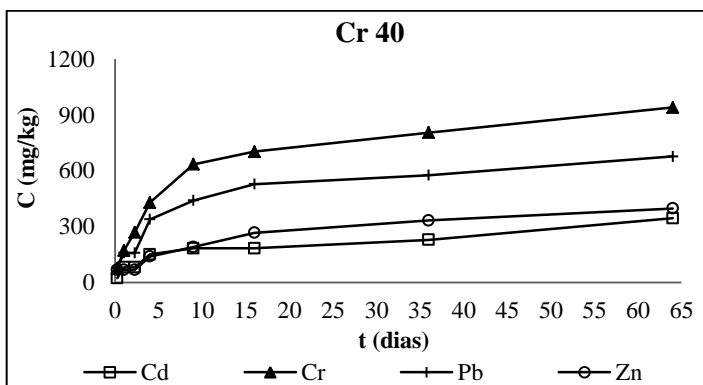


Figura 149 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 40 ppm de cromo.

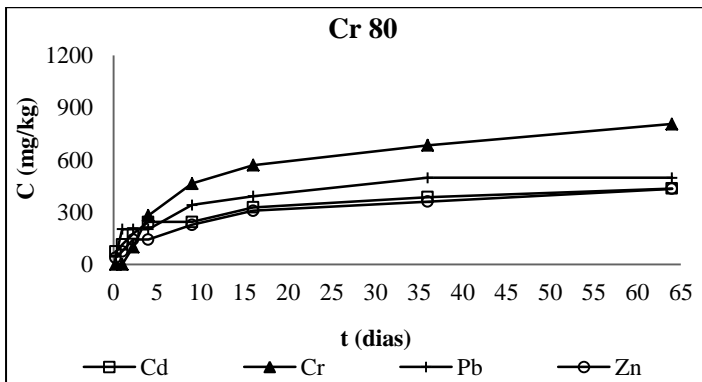


Figura 150 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 80 ppm de cromo.

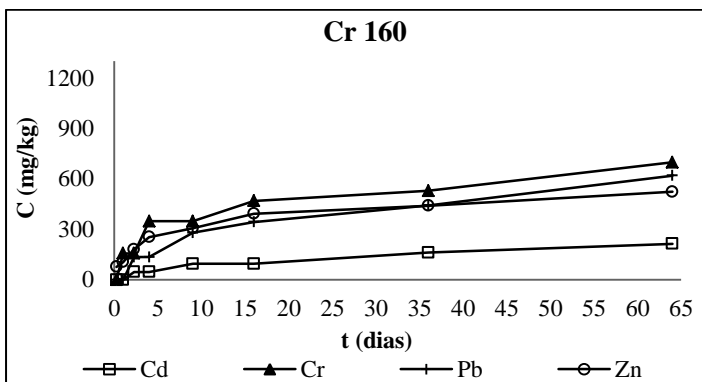
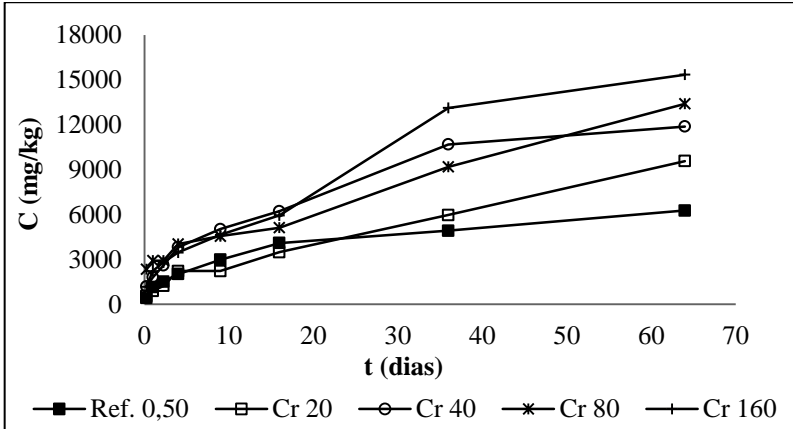


Figura 151 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque da argamassa contaminada com 160 ppm de cromo.

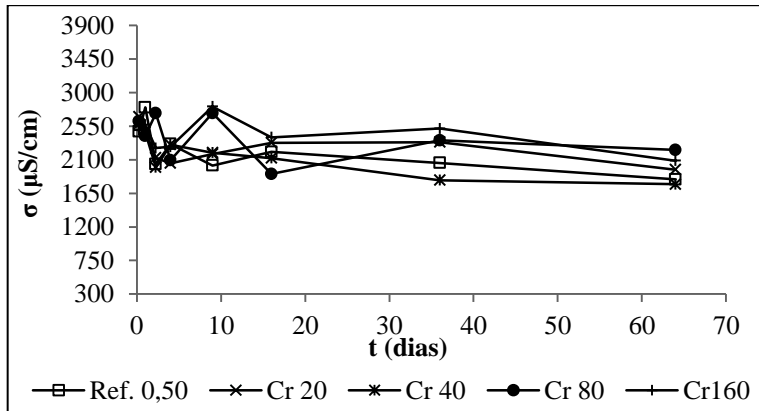
Nas argamassas contaminadas com cromo, conforme aumentou o teor de contaminação, aumentou a quantidade final de cálcio liberada (Figura 152).





**Figura 152 - Liberação de cálcio das argamassas contaminadas com cromo.**

A condutividade elétrica das amostras líquidas referentes às argamassas contaminadas com cromo permaneceu praticamente constante durante todo o ensaio de tanque (Figura 153).



**Figura 153 - Condutividade elétrica das amostras líquidas (argamassas contaminadas com cromo).**

Na argamassa contaminadas com 40 ppm de cromo, a impedância elétrica aumentou com o tempo (Figuras Figura 154 a Figura 157). Nas curvas de impedância obtidas na alta frequência é possível verificar uma diminuição da impedância no início do ensaio, referente a maior taxa de

liberação do metal pesado e maior taxa de absorção da água pelo material monolítico.

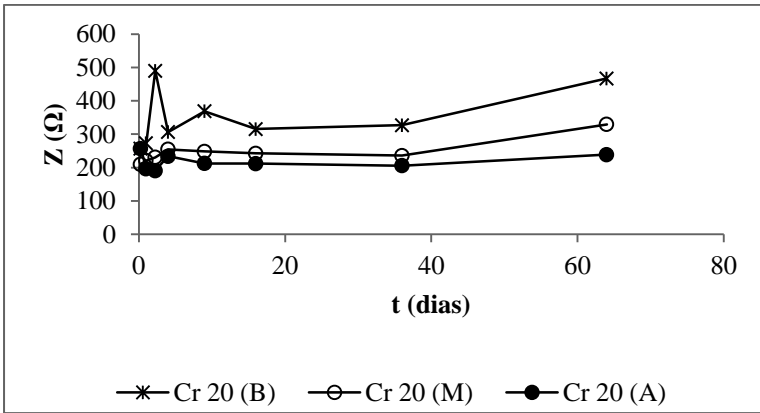


Figura 154- Impedância elétrica da argamassa Cr 20 durante o ensaio de tanque.

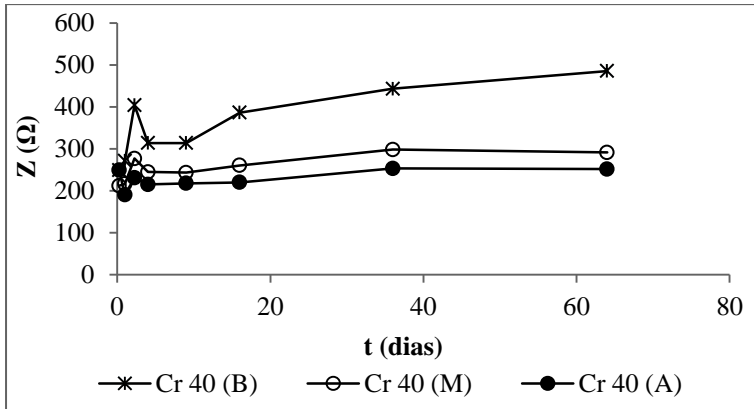


Figura 155 - Impedância elétrica da argamassa Cr 40 durante o ensaio de tanque.

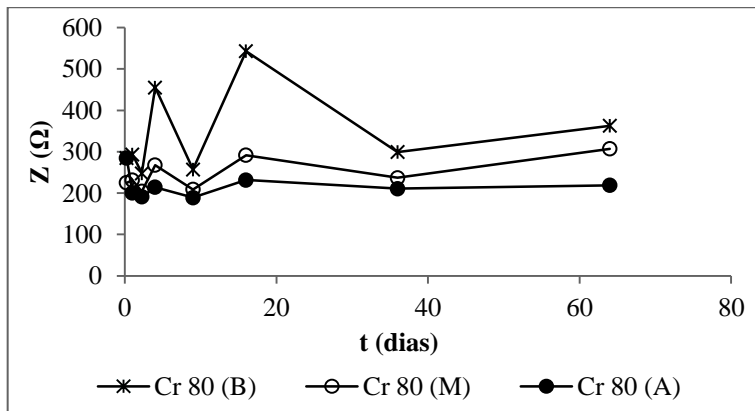


Figura 156 - Impedância elétrica da argamassa Cr 80 durante o ensaio de tanque.

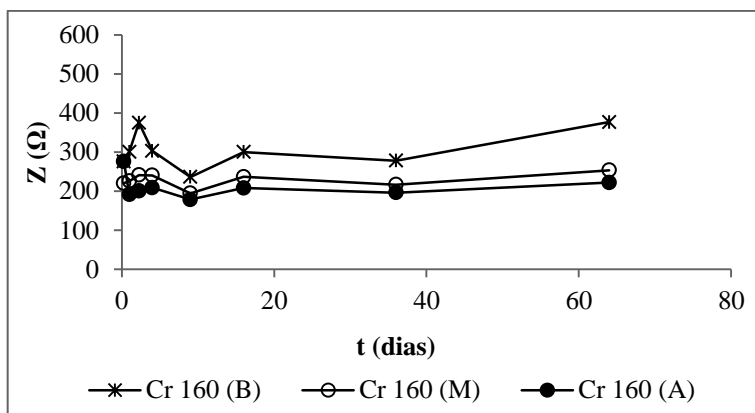


Figura 157 - Impedância elétrica da argamassa Cr 160 durante o ensaio de tanque.

Assim como o cádmio, o elemento cromo apresentou alta mobilidade em todas as argamassas contaminadas com este metal, em todos os ensaios, exceto na argamassa contaminada com 40, 80 e 160 ppm de cromo, nas pastilhas, onde apresentou média mobilidade (Tabela 15).

Como houve maior liberação do cromo nas argamassas contaminadas com 20 e 40 ppm do metal, o coeficiente de difusão destas amostras também foram maiores do que para as argamassas contaminadas com 80 e 160 ppm de cromo.

**Tabela 15 - Taxa de mobilidade das argamassas contaminadas com cromo.**

Cr 20												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	1,96E-11	10,71	<b>Alta</b>	1,43E-11	10,84	<b>Alta</b>	-	-	-	1,76E-10	9,75	<b>Alta</b>
Cr	2,51E-11	10,60	<b>Alta</b>	2,37E-11	10,63	<b>Alta</b>	4,17E-11	10,38	<b>Alta</b>	6,03E-10	9,22	<b>Alta</b>
Pb	2,13E-11	10,67	<b>Alta</b>	-	-	-	-	-	-	1,31E-09	8,88	<b>Alta</b>
Zn	3,36E-11	10,47	<b>Alta</b>	7,03E-11	10,15	<b>Alta</b>	-	-	-	1,28E-10	9,89	<b>Alta</b>
Cr 40												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	2,07E-11	10,68	<b>Alta</b>	9,44E-12	11,03	<b>Média</b>	-	-	-	5,67E-10	9,25	<b>Alta</b>
Cr	1,97E-11	10,71	<b>Alta</b>	3,47E-11	10,46	<b>Alta</b>	6,45E-12	11,19	<b>Média</b>	1,23E-09	8,91	<b>Alta</b>
Pb	1,99E-11	10,70	<b>Alta</b>	1,63E-11	10,79	<b>Alta</b>	-	-	-	1,25E-09	8,90	<b>Alta</b>
Zn	2,06E-11	10,69	<b>Alta</b>	6,07E-11	10,22	<b>Alta</b>	-	-	-	1,06E-09	8,97	<b>Alta</b>
Cr 80												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	1,85E-11	10,73	<b>Alta</b>	6,37E-11	10,20	<b>Alta</b>	-	-	-	-	-	-
Cr	2,01E-11	10,70	<b>Alta</b>	4,30E-11	10,37	<b>Alta</b>	7,87E-12	11,10	<b>Média</b>	7,67E-10	9,12	<b>Alta</b>
Pb	1,45E-11	10,84	<b>Alta</b>	8,67E-12	11,06	<b>Média</b>	-	-	-	1,11E-09	8,96	<b>Alta</b>
Zn	2,09E-11	10,68	<b>Alta</b>	6,25E-11	10,20	<b>Alta</b>	-	-	-	4,82E-10	9,32	<b>Alta</b>
Cr 160												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	2,52E-11	10,60	<b>Alta</b>	2,15E-12	11,67	<b>Média</b>	-	-	-	2,40E-10	9,62	<b>Alta</b>
Cr	2,50E-11	10,60	<b>Alta</b>	2,51E-11	10,60	<b>Alta</b>	2,20E-12	11,66	<b>Média</b>	1,38E-09	8,86	<b>Alta</b>
Pb	2,82E-11	10,55	<b>Alta</b>	8,48E-12	11,07	<b>Média</b>	-	-	-	1,74E-09	8,76	<b>Alta</b>
Zn	2,03E-11	10,69	<b>Alta</b>	3,29E-11	10,48	<b>Alta</b>	-	-	-	7,97E-10	9,10	<b>Alta</b>

#### 4.6.4 Chumbo

As concentrações finais de chumbo, liberadas no ensaio de tanque variaram de 800 a 1100 mg/kg (Figura 158). Estas concentrações liberadas não seguiram nenhuma tendência em relação ao teor de contaminação e apresentaram curvas ascendentes. Ou seja, se houvesse a continuidade do ensaio de tanque, este metal ainda haveria de ser liberado. As concentrações liberadas de cádmio, cromo e zinco, se apresentaram mais constantes a partir dos 16 dias de ensaio, do que as do chumbo (exceto o cromo na argamassa contaminada com 160 ppm de chumbo).

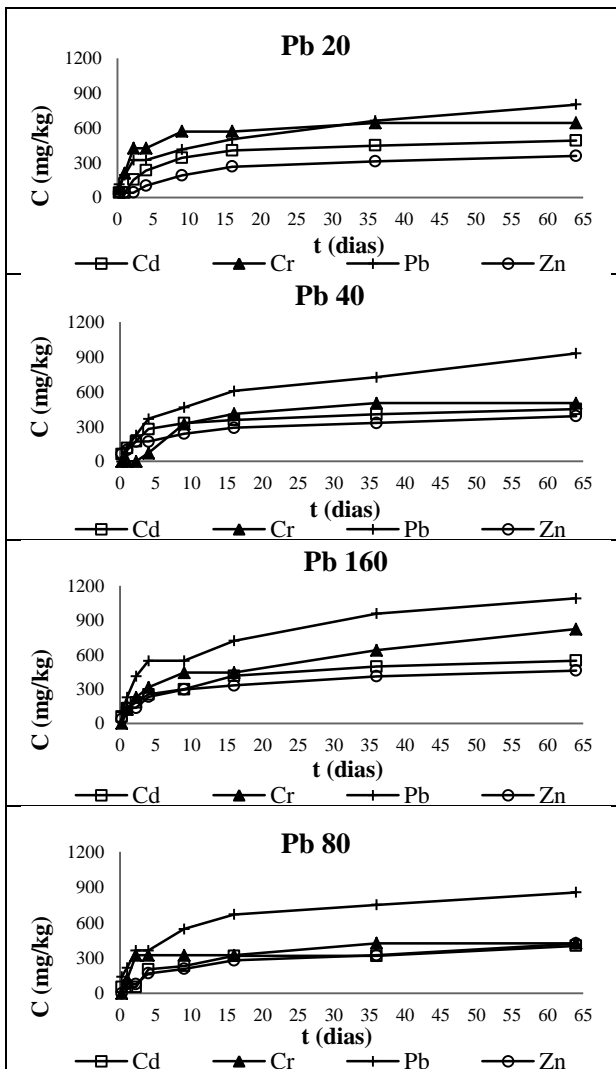
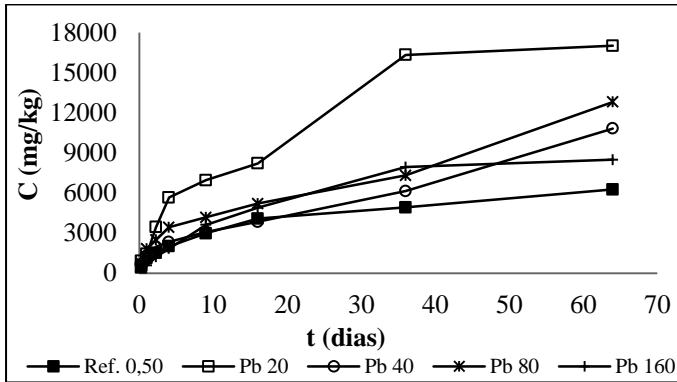


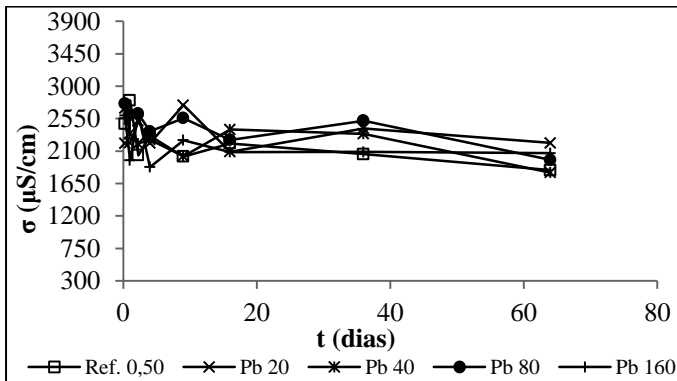
Figura 158 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque das argamassas contaminadas com chumbo.

Nas argamassas contendo chumbo, a menor liberação de cálcio ocorreu na amostra contaminada com 160 ppm de chumbo, a argamassa que apresentou a menor porosidade dentre as amostras contaminadas com chumbo (Figura 159).



**Figura 159 - Liberação de cálcio nas argamassas contaminadas com chumbo.**

As condutividades elétricas das amostras líquidas, referentes às argamassas contaminadas com chumbo, variaram muito pouco ao longo dos 64 dias do ensaio de tanque (Figura 160).



**Figura 160 - Condutividade elétrica das amostras líquidas (argamassas contaminadas com chumbo).**

Com o aumento no teor de contaminação, percebeu-se que a impedância elétrica tende a aumentar com o tempo (Figuras Figura 161 a Figura 164). Na concentração de 20 ppm de chumbo, a argamassa apresentou variação da impedância elétrica na alta frequência, fato que não ocorreu nas demais amostras contaminadas e nas argamassas de

referência. Esta argamassa também foi a que liberou a maior quantidade de cálcio durante o ensaio de tanque. A lixiviação do cálcio aumenta a porosidade da amostra, favorecendo a entrada de água e a diminuição da impedância.

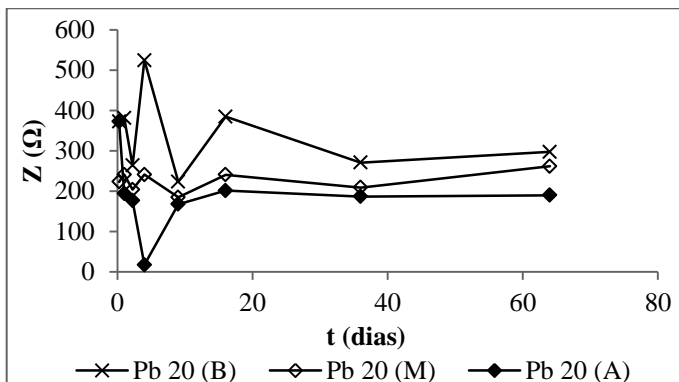


Figura 161 - Impedância elétrica da argamassa Pb 20 durante o ensaio de tanque.

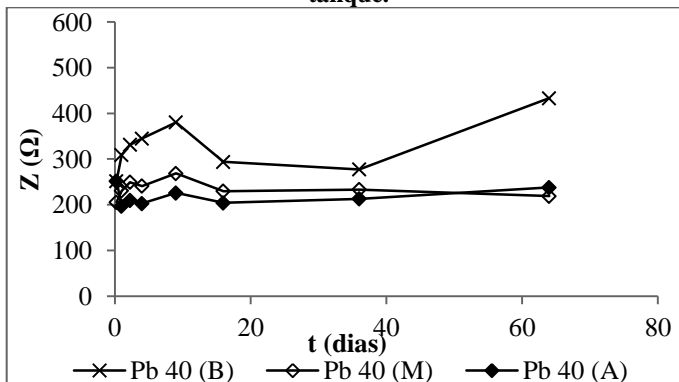


Figura 162 - Impedância elétrica da argamassa Pb 40 durante o ensaio de tanque.

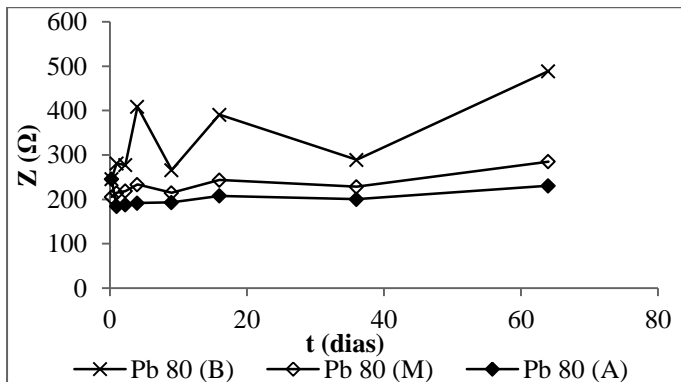


Figura 163 - Impedância elétrica da argamassa Pb 80 durante o ensaio de tanque.

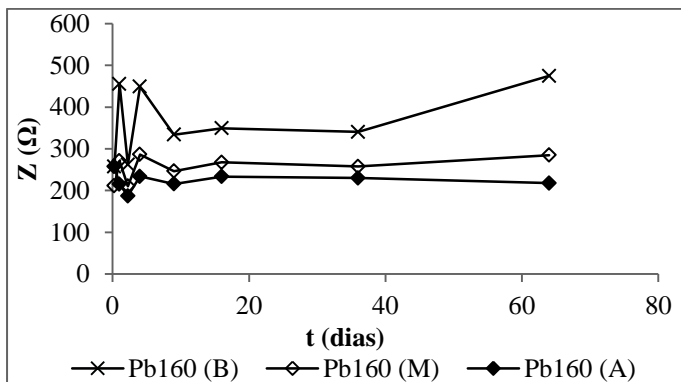


Figura 164 - Impedância elétrica da argamassa Pb 160 durante o ensaio de tanque.

O metal chumbo, sem exceções, mostrou alta mobilidade em todas as argamassas contaminadas com este metal (Tabela 16).



**Tabela 16 - Taxa de mobilidade das argamassas contaminadas com chumbo.**

Pb 20												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	1,74E-11	10,76	<b>Alta</b>	1,44E-11	10,84	<b>Alta</b>	-	-	-	5,10E-10	9,29	<b>Alta</b>
Cr	1,46E-11	10,84	<b>Alta</b>	1,24E-11	10,91	<b>Alta</b>	-	-	-	2,16E-10	9,66	<b>Alta</b>
Pb	2,14E-11	10,67	<b>Alta</b>	2,11E-11	10,68	<b>Alta</b>	4,07E-11	10,39	<b>Alta</b>	1,36E-09	8,86	<b>Alta</b>
Zn	1,93E-11	10,71	<b>Alta</b>	1,28E-11	10,89	<b>Alta</b>	-	-	-	1,59E-10	9,80	<b>Alta</b>
Pb 40												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	1,87E-11	10,73	<b>Alta</b>	4,58E-11	10,34	<b>Alta</b>	-	-	-	8,56E-10	9,07	<b>Alta</b>
Cr	1,52E-11	10,82	<b>Alta</b>	5,10E-12	11,29	<b>Média</b>	-	-	-	5,31E-10	9,27	<b>Alta</b>
Pb	2,51E-11	10,60	<b>Alta</b>	1,08E-10	9,97	<b>Alta</b>	2,46E-11	10,61	<b>Alta</b>	6,82E-10	9,17	<b>Alta</b>
Zn	2,11E-11	10,67	<b>Alta</b>	2,25E-11	10,65	<b>Alta</b>	-	-	-	6,23E-10	9,21	<b>Alta</b>
Pb 80												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	2,30E-11	10,64	<b>Alta</b>	3,85E-11	10,41	<b>Alta</b>	-	-	-	5,60E-10	9,25	<b>Alta</b>
Cr	1,43E-11	10,84	<b>Alta</b>	3,70E-12	11,43	<b>Média</b>	-	-	-	-	-	-
Pb	1,86E-11	10,73	<b>Alta</b>	5,41E-11	10,27	<b>Alta</b>	1,11E-11	10,96	<b>Alta</b>	6,19E-10	9,21	<b>Alta</b>
Zn	2,46E-11	10,61	<b>Alta</b>	1,39E-11	10,86	<b>Alta</b>	-	-	-	-	-	-
Pb 160												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	1,79E-11	10,75	<b>Alta</b>	6,19E-11	10,21	<b>Alta</b>	-	-	-	-	-	-
Cr	2,44E-11	10,61	<b>Alta</b>	1,24E-11	10,91	<b>Alta</b>	-	-	-	5,83E-10	9,23	<b>Alta</b>
Pb	1,90E-11	10,72	<b>Alta</b>	2,77E-11	10,56	<b>Alta</b>	1,52E-11	10,82	<b>Alta</b>	1,10E-09	8,96	<b>Alta</b>
Zn	1,85E-11	10,73	<b>Alta</b>	2,18E-11	10,66	<b>Alta</b>	-	-	-	6,63E-10	9,18	<b>Alta</b>

#### 4.6.5 Zinco

As argamassas contaminadas com zinco liberaram maiores quantidades de chumbo e de cromo, do que de zinco (Figura 165). A argamassa que liberou mais zinco foi a contaminada com 80 ppm de zinco e a concentração final de zinco liberada por esta argamassa não passou de 700 mg/kg. A argamassa com maior concentração de zinco, liberou menos zinco do que os demais metais (cádmio, cromo e chumbo).

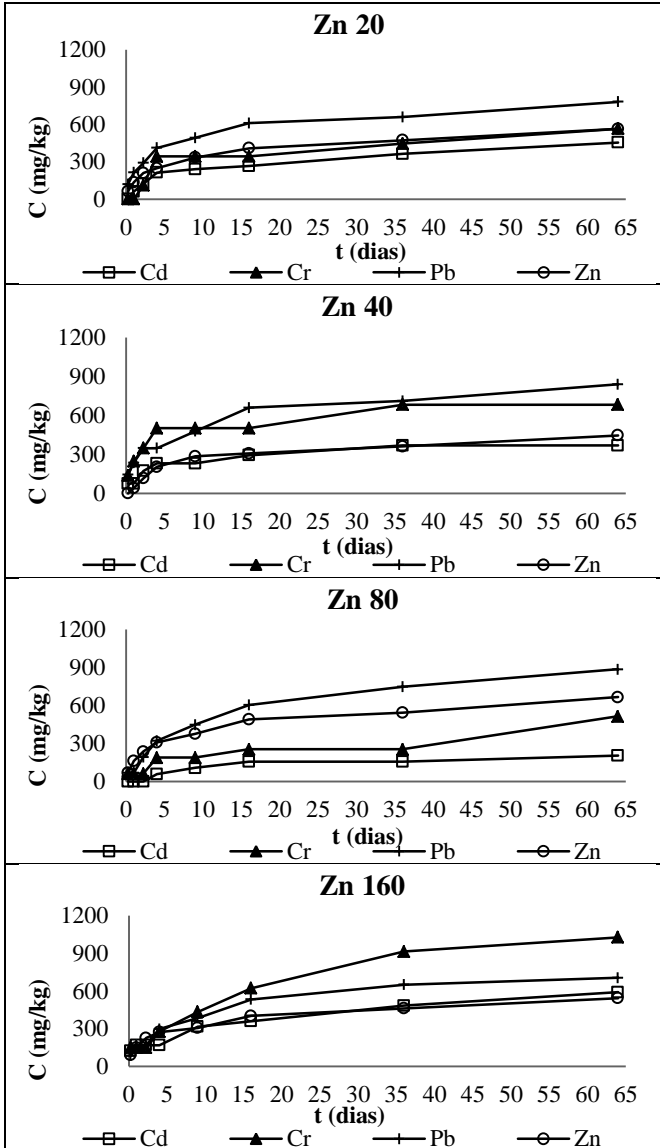


Figura 165 - Concentração liberada de Cd, Cr, Pb e Zn ao longo dos 64 dias no ensaio de tanque das argamassas contaminadas com zinco.

E nas amostras contaminadas com zinco, com o aumento do teor de contaminação aumentou a liberação de cálcio (Figura 166).

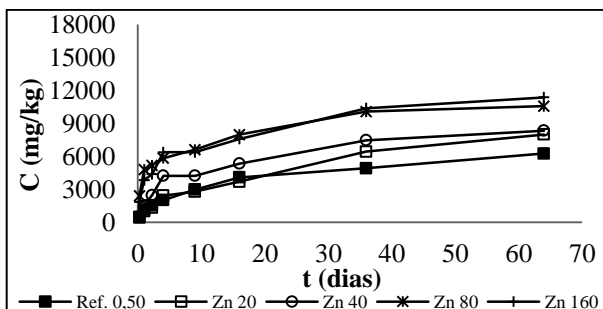


Figura 166 - Liberações do cálcio das argamassas contaminadas com zinco.

Em cada extração foi coletada a água de dentro dos tanques, este líquido lixiviante foi filtrado e de certa alíquota mediu-se o pH e a condutividade elétrica. Os dados de condutividade elétrica das amostras líquidas, ao longo dos 64 dias de ensaio, estão apresentados na Figura 167. No início do ensaio as amostras líquidas apresentaram maior condutividade elétrica e depois de 16 dias de ensaio a condutividade elétrica começa a diminuir ou permanece constante.

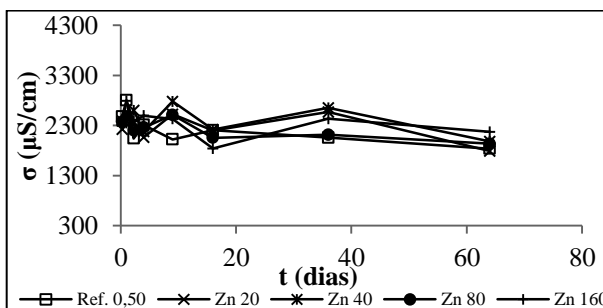


Figura 167- Condutividade elétrica das amostras líquidas (argamassas contaminadas com zinco).

Conforme os metais pesados são liberados, a impedância elétrica aumenta nas argamassas contaminadas com 20 e 40 ppm de zinco. Na impedância elétrica obtida na alta frequência também foi possível verificar a diminuição da impedância no início do ensaio de tanque (Figuras Figura 168 a Figura 171).

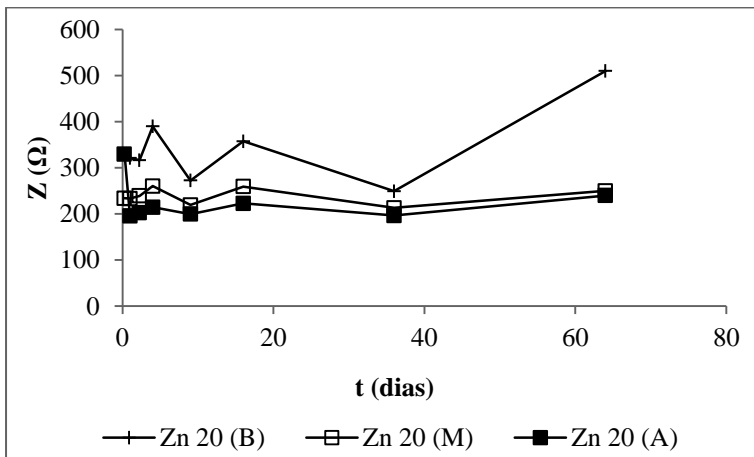


Figura 168 – Impedância elétrica da argamassa Zn 20 durante o ensaio de tanque.

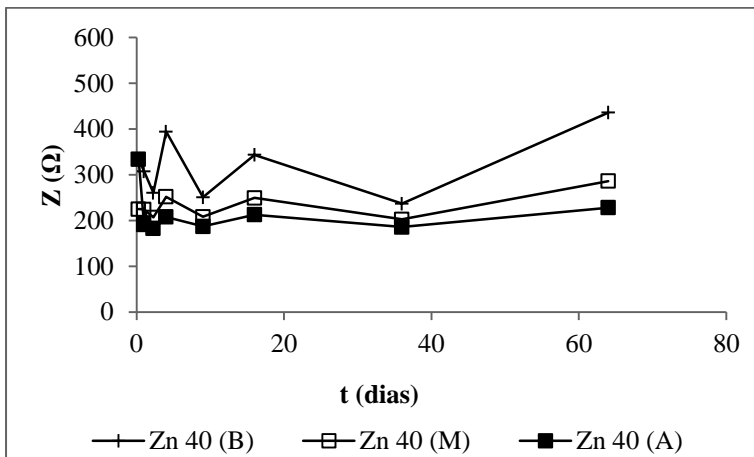


Figura 169 – Impedância elétrica da argamassa Zn 40 durante o ensaio de tanque.

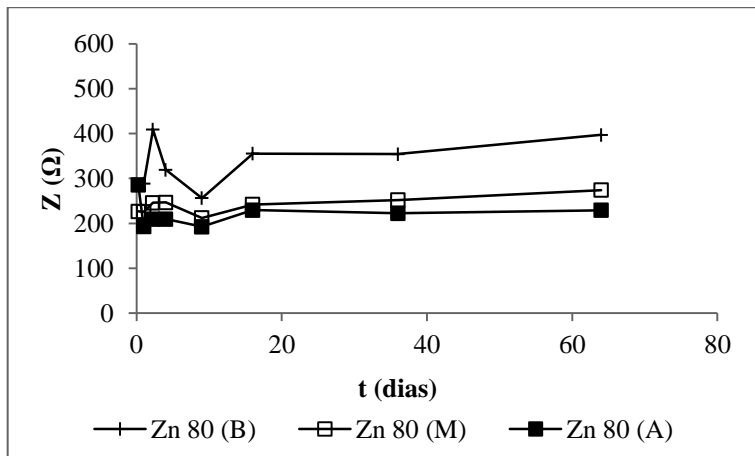


Figura 170 – Impedância elétrica da argamassa Zn 80 durante o ensaio de tanque.

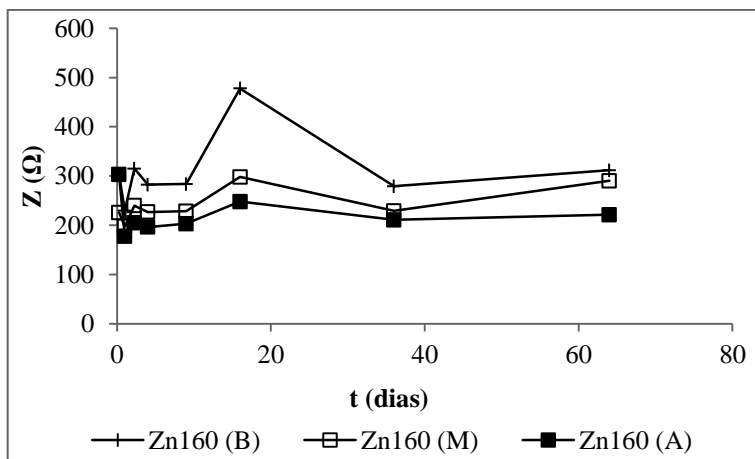


Figura 171– Impedância elétrica da argamassa Zn 20 durante o ensaio de tanque.

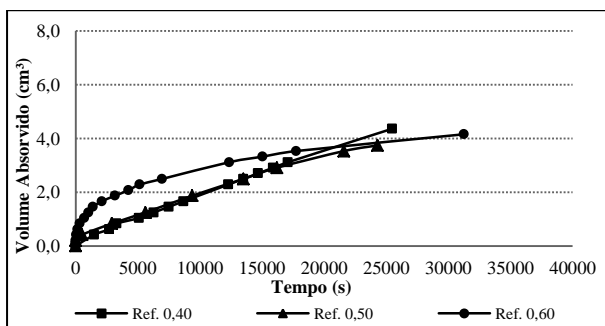
Nas argamassas contaminadas com zinco, o metal apresentou média mobilidade nas pastilhas e nas demais, apresentou alta mobilidade (Tabela 17).

**Tabela 17 - Taxa de mobilidade das argamassas contaminadas com zinco.**

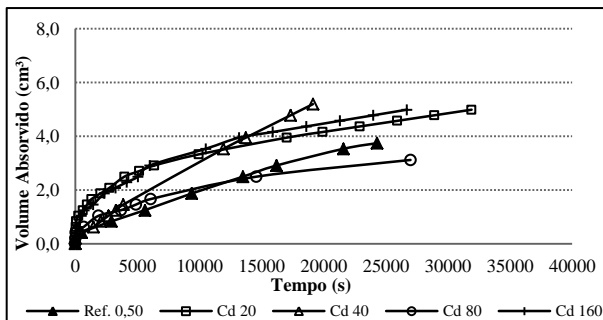
Zn 20												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	2,32E-11	10,64	<b>Alta</b>	4,90E-11	10,31	<b>Alta</b>	-	-	-	1,01E-09	9,00	<b>Alta</b>
Cr	2,38E-11	10,62	<b>Alta</b>	1,34E-11	10,87	<b>Alta</b>	-	-	-	1,98E-10	9,70	<b>Alta</b>
Pb	2,08E-11	10,68	<b>Alta</b>	1,94E-11	10,71	<b>Alta</b>	-	-	-	1,54E-09	8,81	<b>Alta</b>
Zn	2,10E-11	10,68	<b>Alta</b>	7,98E-11	10,10	<b>Alta</b>	8,45E-12	11,07	<b>Média</b>	1,99E-09	8,70	<b>Alta</b>
Zn 40												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	1,43E-11	10,84	<b>Alta</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr	1,43E-11	10,84	<b>Alta</b>	1,23E-11	10,91	<b>Alta</b>	-	-	-	-	-	-
Pb	2,00E-11	10,70	<b>Alta</b>	3,13E-11	10,50	<b>Alta</b>	-	-	-	-	-	-
Zn	2,19E-11	10,66	<b>Alta</b>	1,30E-11	10,89	<b>Alta</b>	2,64E-12	11,58	<b>Média</b>	4,83E-10	9,32	<b>Alta</b>
Zn 80												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	2,47E-11	10,61	<b>Alta</b>	2,40E-12	11,62	<b>Média</b>	-	-	-	1,06E-10	9,97	<b>Alta</b>
Cr	5,90E-11	10,23	<b>Alta</b>	1,39E-11	10,86	<b>Alta</b>	-	-	-	-	-	-
Pb	2,02E-11	10,70	<b>Alta</b>	1,92E-11	10,72	<b>Alta</b>	-	-	-	-	-	-
Zn	2,16E-11	10,67	<b>Alta</b>	4,69E-11	10,33	<b>Alta</b>	3,76E-12	11,42	<b>Média</b>	2,03E-09	8,69	<b>Alta</b>
Zn 160												
Elementos	Tanque			NBR 10005			Pastilha			Solubilização		
	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.	D <sub>e</sub>	ρD <sub>e</sub>	Classif.
Cd	2,18E-11	10,66	<b>Alta</b>	2,16E-11	10,67	<b>Alta</b>	-	-	-	5,05E-10	9,30	<b>Alta</b>
Cr	1,85E-11	10,73	<b>Alta</b>	-	-	-	-	-	-	6,97E-10	9,16	<b>Alta</b>
Pb	1,72E-11	10,76	<b>Alta</b>	1,87E-11	10,73	<b>Alta</b>	-	-	-	-	-	-
Zn	2,02E-11	10,69	<b>Alta</b>	3,23E-11	10,49	<b>Alta</b>	1,17E-12	11,93	<b>Média</b>	8,11E-10	9,09	<b>Alta</b>

#### 4.7 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

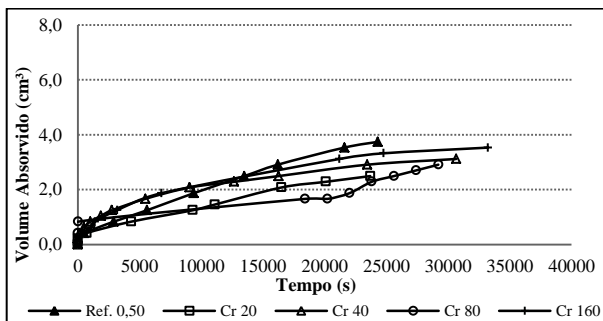
No ensaio de absorção de água por capilaridade foi possível obter a quantidade de água absorvida pelas argamassas e a cinética das curvas encontram-se apresentadas nas Figura 172 a Figura 176.



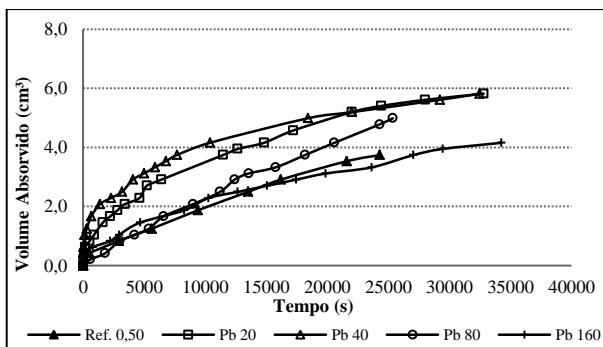
**Figura 172 - Volume de água absorvido nas argamassas de referência durante o ensaio de absorção capilar.**



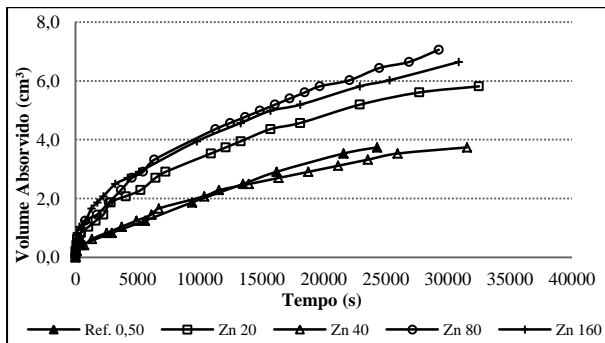
**Figura 173- Volume de água absorvido nas argamassas contaminadas com cádmio, durante o ensaio de absorção capilar.**



**Figura 174- Volume de água absorvido nas argamassas contaminadas com cromo, durante o ensaio de absorção capilar.**



**Figura 175- Volume de água absorvido nas argamassas contaminadas com chumbo, durante o ensaio de absorção capilar.**



**Figura 176 - Volume de água absorvido nas argamassas contaminadas com zinco, durante o ensaio de absorção capilar.**

Através deste ensaio também foi possível calcular a capacidade de absorção das argamassas em relação à raiz do tempo, ou seja, as sorptividades das argamassas. De acordo com a Tabela 18, a sorptividade não foi alterada significativamente com a contaminação das argamassas.

**Tabela 18 - Sorptividade das argamassas.**

Amostra	Sorptividade (cm.min <sup>1/2</sup> )
Referência 0,40	0,0019
Referência 0,50	0,0015
Referência 0,60	0,0010
Cd 20	0,0012
Cd 40	0,0025
Cd 80	0,0009
Cd 160	0,0015
Cr 20	0,0012
Cr 40	0,0009
Cr 80	0,0017
Cr 160	0,0010
Pb 20	0,0017
Pb 40	0,0017
Pb 80	0,0020
Pb 160	0,0011
Zn 20	0,0017
Zn 40	0,0011
Zn 80	0,0021
Zn 160	0,0019



A máxima sorptividade observada foi da argamassa contaminada com 40 ppm de cádmio e as mínimas foram das argamassas contaminadas com 80 ppm de cádmio e 40 ppm de cromo. Embora a argamassa contaminada com 40 ppm de cromo tenha apresentada maior porosidade, ela não possui grande capacidade de absorver água por capilaridade. Há outros parâmetros que influenciam no ensaio de absorção capilar como o diâmetro médio dos poros.

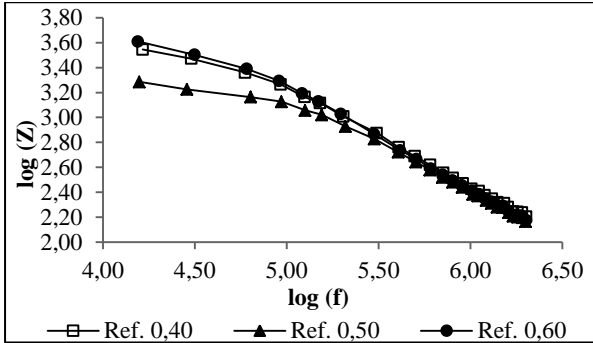
#### 4.8 IMPEDÂNCIA ELÉTRICA APÓS O ENSAIO DE ABSORÇÃO CAPILAR

Depois do ensaio de absorção de água por capilaridade, as argamassas foram armazenadas, de maneira que não houvesse troca de umidade com o ambiente, durante oito e 28 dias, e novamente submetidas ao ensaio de impedância elétrica. Procurou-se dessa forma verificar se a fase líquida pode se estender no espaço poroso, ocasionando uma melhor distribuição do conteúdo de umidade.

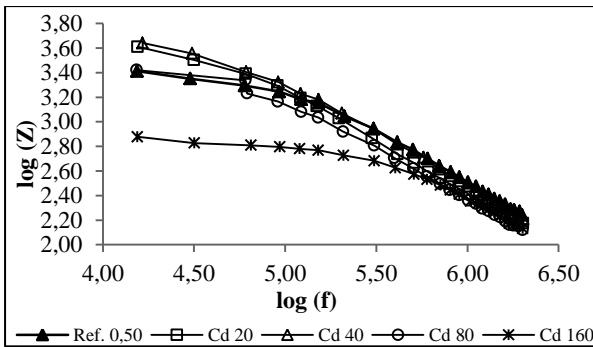
##### 4.8.1 Ensaio de impedância realizado oito dias após o ensaio de absorção

A evolução da impedância em relação à frequência analisada demonstrou que para as argamassas úmidas, a impedância pode ser mais bem diferenciada em faixas de pequenas frequências. Com o aumento da frequência, as curvas do  $\log(Z) \times \log(f)$  se aproximam umas das outras. Entre as argamassas de referência, a de relação a/c igual a 0,50 foi a amostra que apresentou menores valores de impedância (Figura 177).

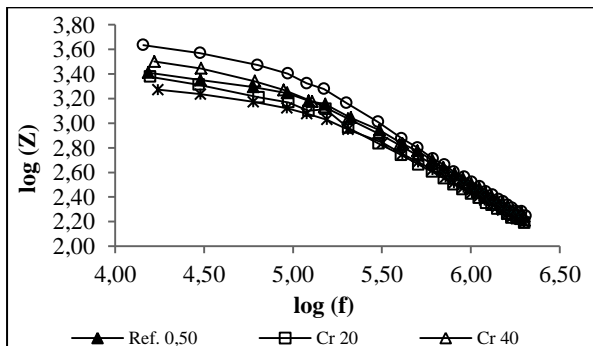
Para as argamassas contaminadas com cádmio, as argamassas com maior teor de contaminação apresentaram as menores impedâncias elétricas (Figura 178).



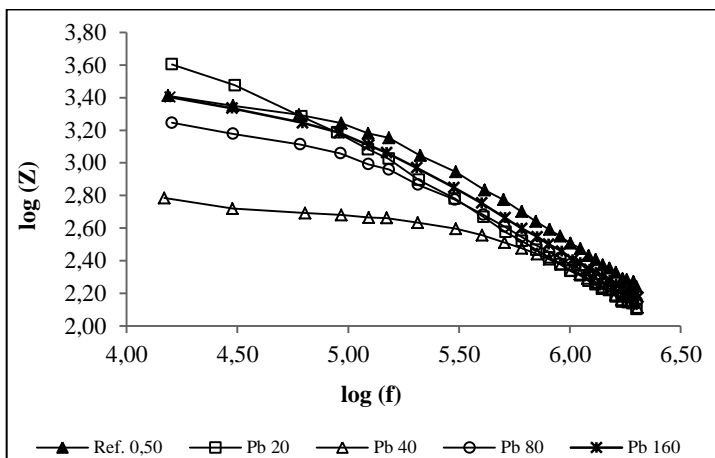
**Figura 177 – Impedância das argamassas de referência oito dias após o ensaio de absorção.**



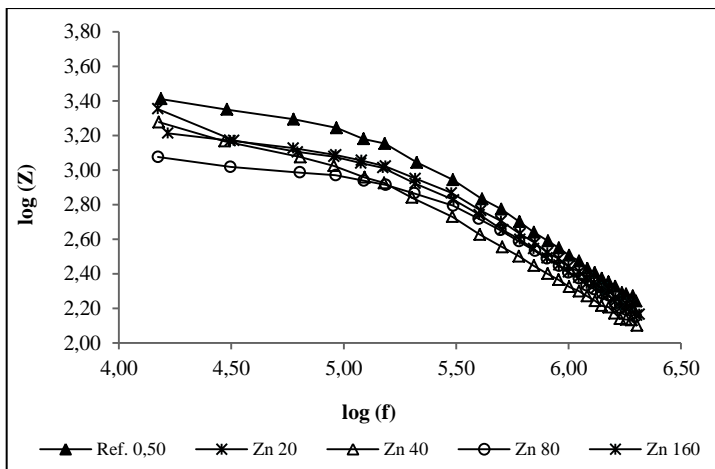
**Figura 178 – Impedância das argamassas contaminadas com cádmio oito dias após o ensaio de absorção.**



**Figura 179 – Impedância das argamassas contaminadas com cromo oito dias após o ensaio de absorção.**



**Figura 180 – Impedância das argamassas contaminadas com chumbo oito dias após o ensaio de absorção.**

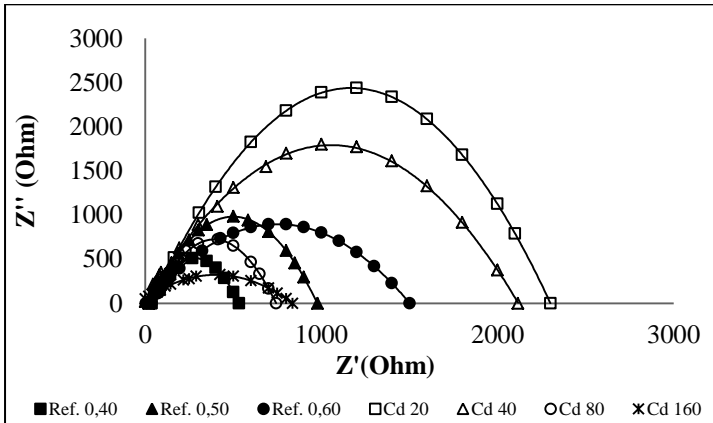


**Figura 181 – Impedância das argamassas contaminadas com zinco oito dias após o ensaio de absorção.**

Após o ensaio de absorção capilar, as argamassas contaminadas com cádmio apresentaram curvas de menores alturas nos espectros de impedância, ou seja, a capacitância das argamassas foi menor após o ensaio de absorção, do que as verificadas aos 28 dias de cura dessas argamassas. As resistências elétricas totais obtidas nesta etapa também

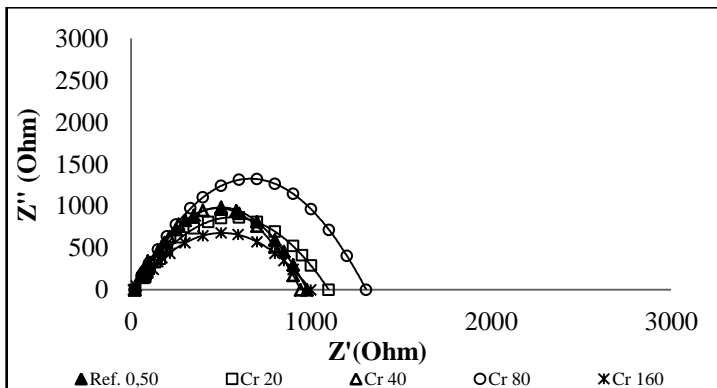
foram menores, com exceção das argamassas contaminadas com 20 e 40 ppm de cádmio (Figura 182).

As argamassas de referência apresentaram valores de resistência elétrica menores após o ensaio de absorção em relação ao ensaio realizado aos 28 dias de cura. Em ordem crescente de resistência elétrica total, têm-se as argamassas com relação a/c igual a 0,40, 0,50 e 0,60. De acordo com esta ordem, conforme aumentou a quantidade de água, proporcionalmente a quantidade de cimento, maior foi a resistência elétrica total nas argamassas de referência.



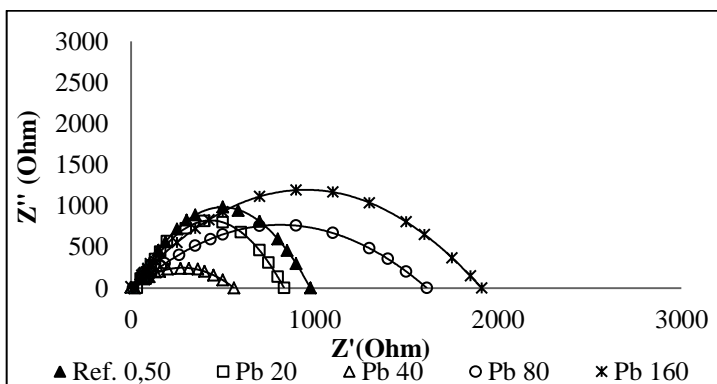
**Figura 182 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com cádmio oito dias após o ensaio de absorção capilar.**

Na Figura 183 são apresentados os espectros de impedância das argamassas contaminadas com cromo. Nestas curvas foi possível verificar uma diminuição dos valores de reatância e resistência elétrica, em relação aos 28 dias de cura destas amostras.



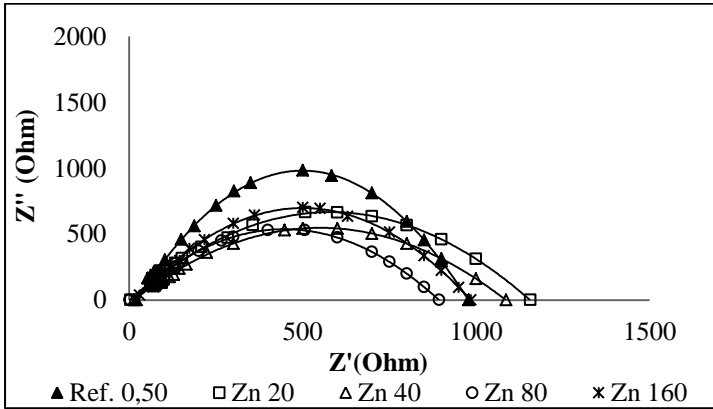
**Figura 183 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com cromo oito dias após o ensaio de absorção capilar.**

Para as argamassas contaminadas com chumbo (Figura 184), a amostra contaminada com 160 ppm de chumbo apresentou maior resistência elétrica total e a contaminada com 40 ppm a menor resistência. E exatamente estas amostras, aos 28 dias de cura, apresentaram comportamentos contrários: na concentração de 40 ppm a argamassa apresentou maior resistência elétrica e com 160 ppm a menor resistência elétrica total. Este fato pode estar veiculado a maior polarização dos íons em presença da água (após absorção).



**Figura 184 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com chumbo oito dias após o ensaio de absorção capilar.**

Para as amostras contaminadas com zinco (Figura 185), todas as argamassas apresentaram resistências elétricas totais próximas a da amostra de referência de mesma relação a/c (0,50) do que as contaminadas. E as resistências e reatâncias elétricas destas amostras foram menores após o ensaio de absorção do que aos 28 dias de cura, e em relação às outras argamassas submetidas ao ensaio de absorção.



**Figura 185 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com zinco oito dias após o ensaio de absorção capilar.**

Os gráficos referentes à permissividade elétrica das argamassas após o ensaio de absorção capilar apresentaram uma inflexão que não foi verificada aos 28 dias de cura. Esta inflexão significa que há uma maior variação da permissividade elétrica frente à variação da frequência, provocada pela presença da água na argamassa. Com o aumento da porosidade nas argamassas de referência, maior o teor de umidade, maior o preenchimento dos poros capilares e a permissividade, portanto, também é maior (Figura 186).

As argamassas contaminadas com chumbo e zinco apresentaram permissividade elétrica maior do que a argamassa de referência. (FigurasFigura 186 a Figura 190).

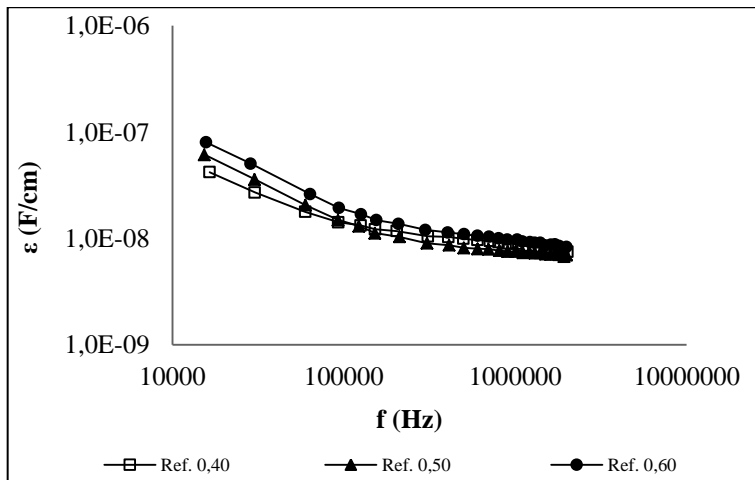


Figura 186 – Permissividade das argamassas de referência oito dias após o ensaio de absorção capilar.

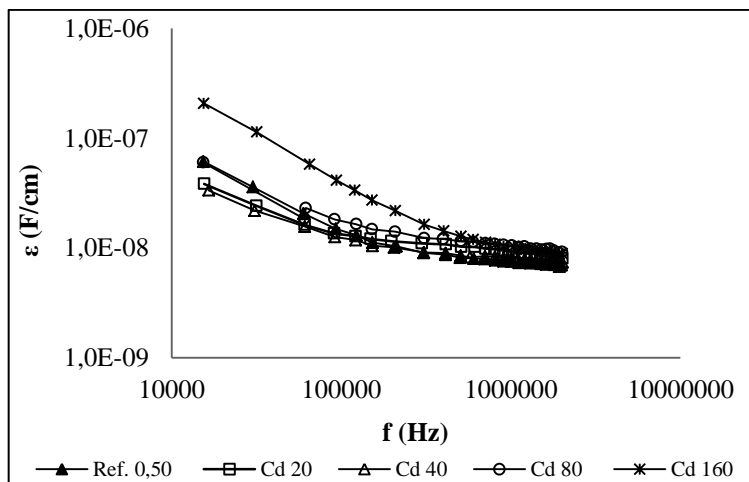


Figura 187 - Permissividade das argamassas contaminadas com cádmio oito dias após o ensaio de absorção capilar.

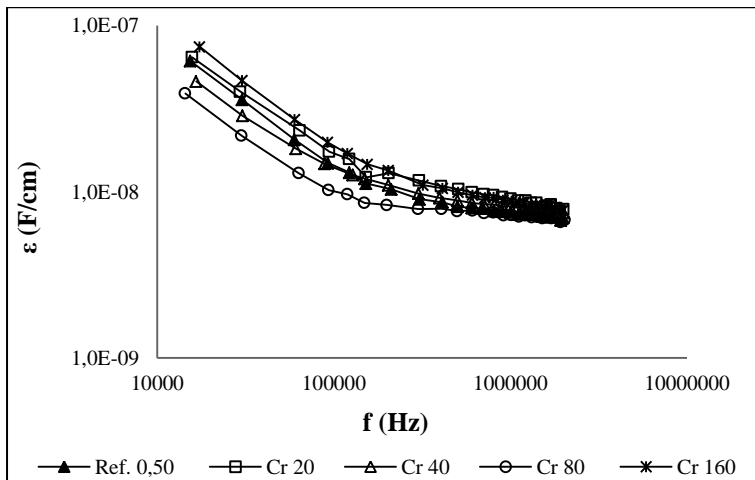


Figura 188 - Permissividade das argamassas contaminadas com cromo oito dias após o ensaio de absorção capilar.

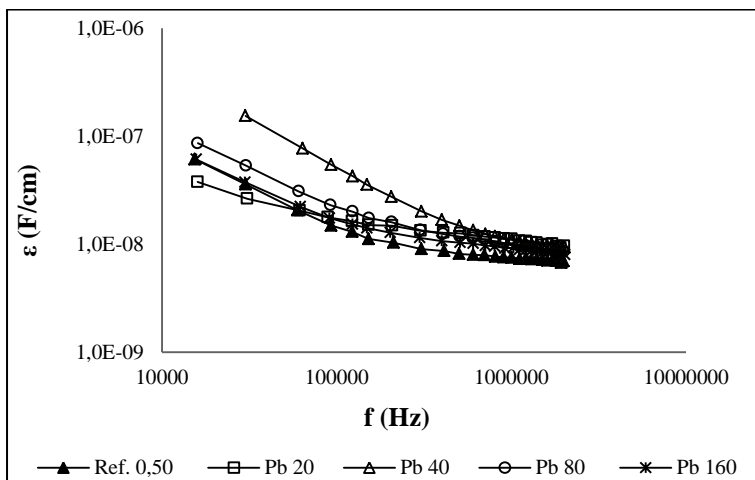
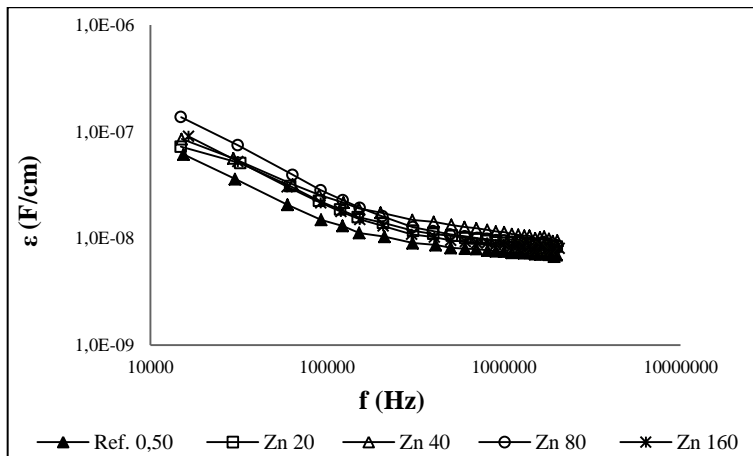


Figura 189 - Permissividade das argamassas contaminadas com chumbo oito dias após o ensaio de absorção capilar.





**Figura 190 - Permissividade das argamassas contaminadas com zinco oito dias após o ensaio de absorção capilar.**

De acordo com as permissividades elétricas obtidas para as argamassas de referência, com o aumento das relações a/c das amostras, maior a permissividade elétrica (Figura 186). Na contaminação com cádmio, a tendência observada foi o aumento da permissividade elétrica com o aumento do teor de contaminação (Figura 187). Nas argamassas contaminadas com cromo (Figura 188), já não se observou nenhuma relação da permissividade elétrica e o teor de contaminação, uma vez que, a argamassa contaminada com 20 ppm apresentou permissividade elétrica próxima a da argamassa contaminada com 160 ppm.

#### **4.8.2 Ensaio de impedância realizado 28 dias após o ensaio de absorção**

Depois de 28 dias do ensaio de absorção capilar, as propriedades elétricas das argamassas foram novamente avaliadas.

Comparando-se os gráficos logarítmicos, da impedância em relação a frequência, com os obtidos após oito dias do ensaio de absorção capilar, aos 28 dias após o ensaio os valores de impedância elétrica obtidos foram menores, as inflexões nas curvas não foram observadas e houve pouquíssima variação de uma amostra para outra nas curvas obtidas.

A argamassa de maior relação a/c apresentou menor impedância elétrica (Figura 191).

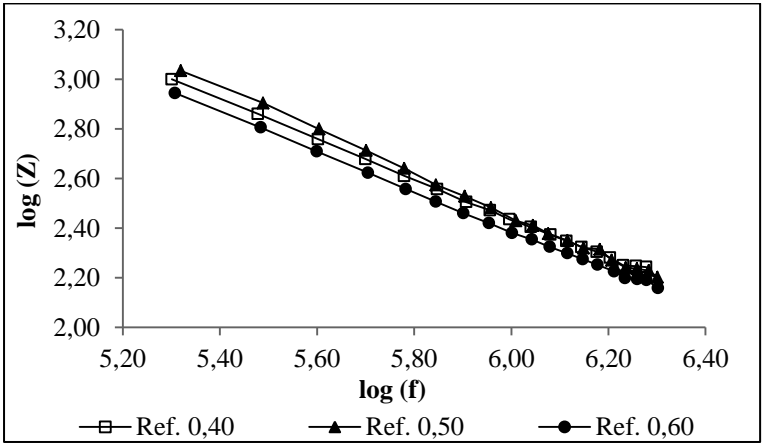


Figura 191 - Impedância das argamassas de referência 28 dias após o ensaio de absorção capilar.

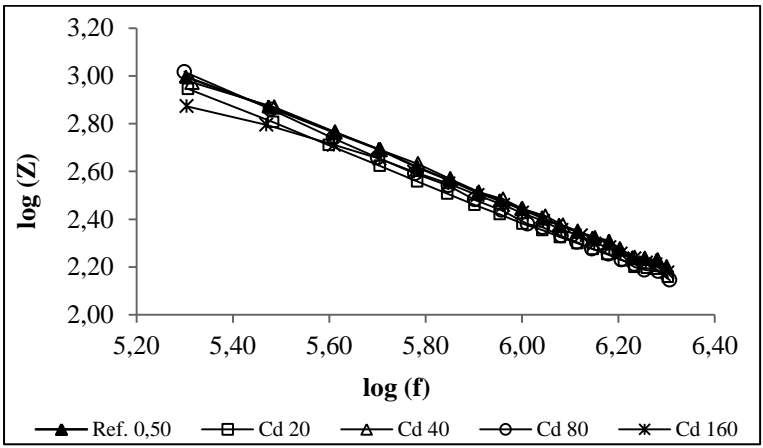
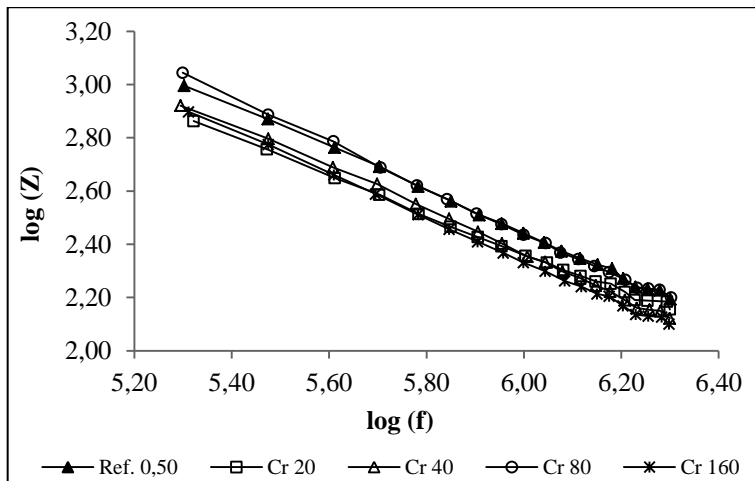
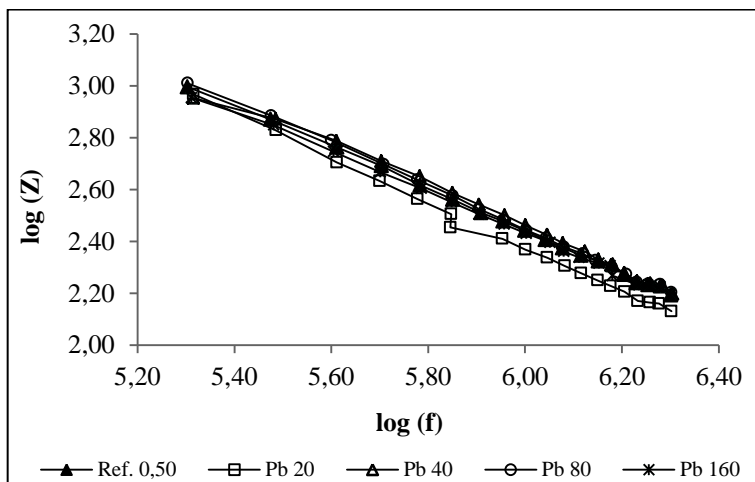


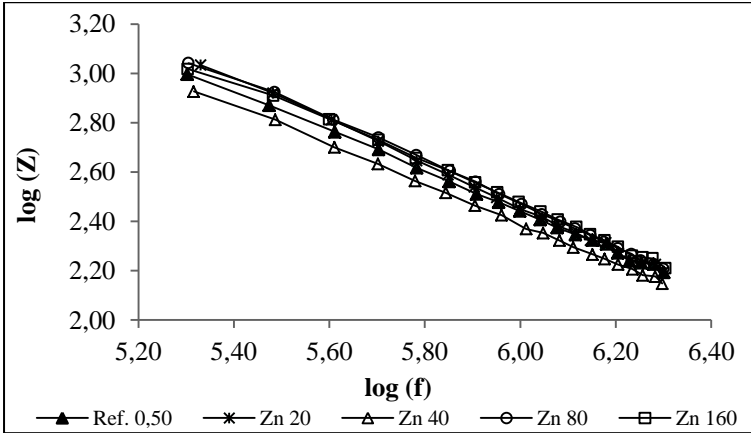
Figura 192 - Impedância das argamassas contaminadas com cádmio 28 dias após o ensaio de absorção capilar.



**Figura 193 – Impedância das argamassas contaminadas com cromo 28 dias após o ensaio de absorção capilar.**

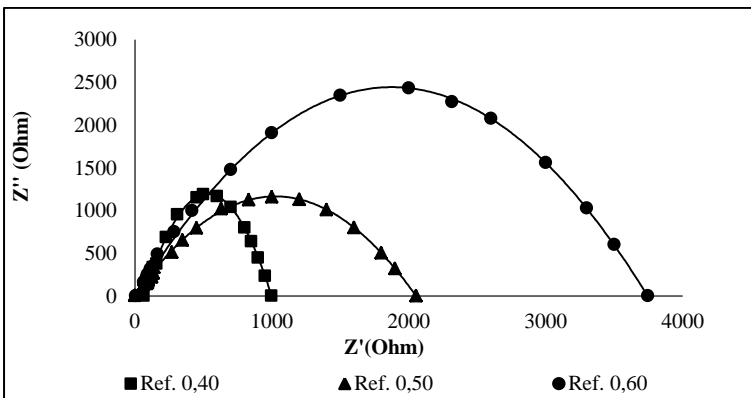


**Figura 194 – Impedância das argamassas contaminadas com chumbo 28 dias após o ensaio de absorção capilar.**



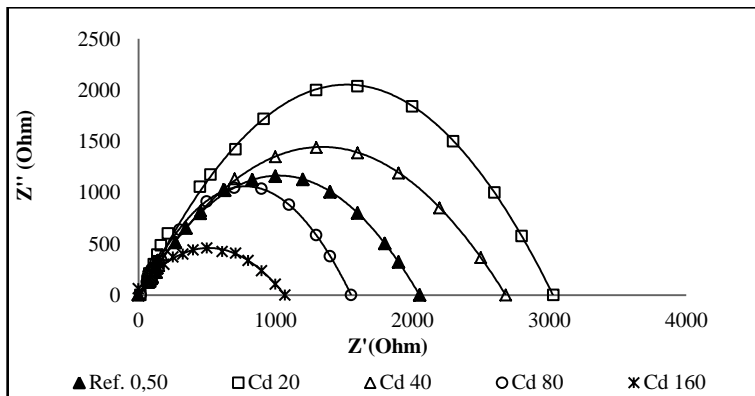
**Figura 195 – Impedância das argamassas contaminadas com zinco 28 dias após o ensaio de absorção capilar.**

Após 28 dias do ensaio de absorção capilar, as resistências elétricas das argamassas de referência aumentaram (Figura 196) em relação a análise feita após oito dias do ensaio de absorção capilar, mas, ainda foram menores do que as encontradas aos 28 dias de cura.



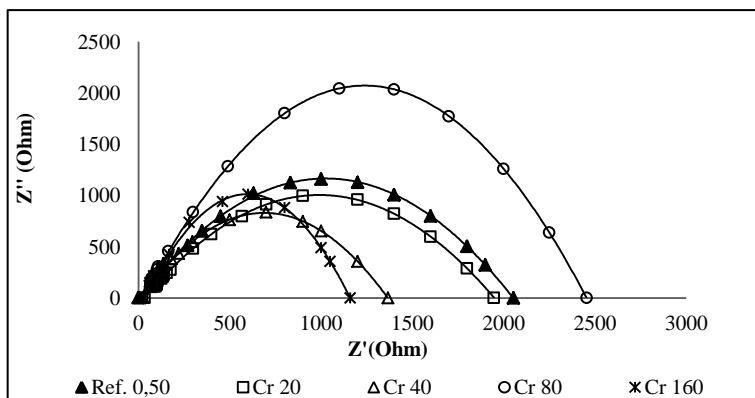
**Figura 196 - Espectros de impedância das argamassas de referência 28 dias após o ensaio de absorção capilar.**

A resistência elétrica das argamassas contaminadas com cádmio diminuiu com o aumento da concentração do metal (Figura 197).



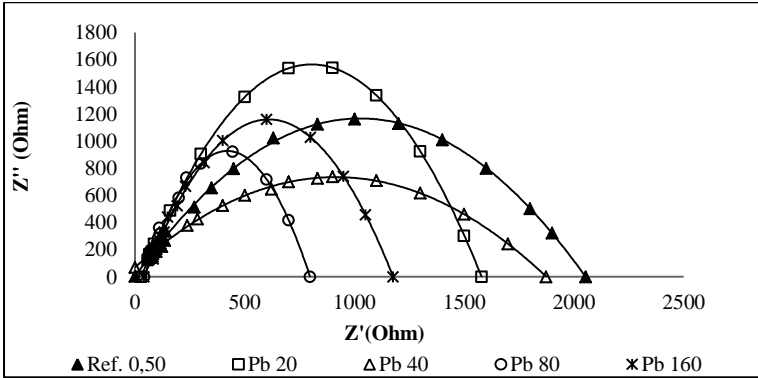
**Figura 197 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com cádmio 28 dias após o ensaio de absorção capilar.**

De acordo com a análise química realizada nas argamassas contaminadas com cromo, a argamassa contaminada com 40 pm de cromo apresentou uma quantidade de cromo muito próxima a da argamassa contaminada com 160 ppm. Devido a este fato, as resistências elétricas destas amostras se aproximaram (Figura 198).



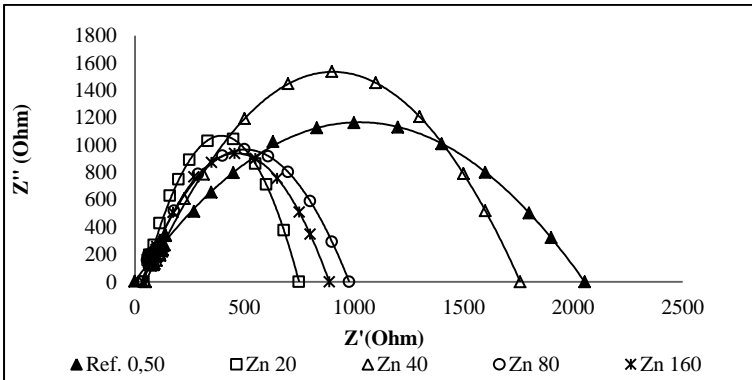
**Figura 198 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com cromo 28 dias após o ensaio de absorção capilar.**

Todas as argamassas contaminadas com chumbo apresentaram resistências elétricas menores do que a argamassa de referência (Figura 199).



**Figura 199 - Espectros de impedância das argamassas contaminadas com chumbo 28 dias após o ensaio de absorção capilar.**

A capacitância elétrica das argamassas contaminadas com zinco foram maiores (arcos mais altos) e as argamassas contaminadas apresentaram resistências elétricas menores do que a argamassa de referência (relação a/c igual a 0,50) (Figura 200).



**Figura 200 – Espectros de impedância das argamassas contaminadas com zinco 28 dias após o ensaio de absorção capilar.**

Assim como houve pouca variação da impedância elétrica de uma amostra para outra, para os valores de permissividade aconteceu o mesmo. As curvas de permissividade em relação a frequência se aproximaram em relação ao ensaio realizado apenas 8 dias após o ensaio de absorção capilar. Outra distinção observada foi a diminuição da permissividade elétrica das argamassas. No entanto como não foi

possível distinguir as curvas da permissividade elétrica neste ensaio com 28 dias após o ensaio de absorção, elas não serão aqui apresentadas.

A água livre presente nas argamassas oito dias após o ensaio de absorção influenciava na passagem da corrente elétrica e na maior movimentação dos íons dentro da matriz cimentícias e de sua rede de poros, provocando o aumento da permissividade elétrica e uma menor resistência elétrica. Com a melhor distribuição da água na argamassa com passar do tempo, após a sua saturação parcial ou total, a água possivelmente não está mais livre nos interstícios capilares, podendo aumentar a resistência elétrica das argamassas.

#### 4.9 TORTUOSIDADE

Os valores de tortuosidade foram calculados e dispostos na Tabela 19. A referência de menor relação a/c apresentou a menor tortuosidade e o maior índice de vazios. A amostra de relação a/c igual a 0,50 apresentou menor tortuosidade do que a argamassa de relação a/c igual a 0,60.

**Tabela 19- Tortuosidade das argamassas.**

Amostras	$\tau$	Amostras	$\tau$
<b>Ref. 0,40</b>	86,251	<b>Cr 160</b>	93,043
<b>Ref. 0,50</b>	99,239	<b>Pb 20</b>	80,993
<b>Ref. 0,60</b>	97,369	<b>Pb 40</b>	53,025
<b>Cd 20</b>	90,427	<b>Pb 80</b>	78,721
<b>Cd 40</b>	100,304	<b>Pb 160</b>	92,431
<b>Cd 80</b>	64,654	<b>Zn 20</b>	72,527
<b>Cd 160</b>	55,004	<b>Zn 40</b>	69,860
<b>Cr 20</b>	85,221	<b>Zn 80</b>	75,562
<b>Cr 40</b>	71,905	<b>Zn 160</b>	101,668
<b>Cr 80</b>	137,280		

Com a adição de 80 e 160 ppm de cádmio as argamassas apresentaram uma diminuição da tortuosidade. Em relação à argamassa de referência (a/c igual a 0,50), a adição do cromo, chumbo e zinco nas argamassas diminuiu a tortuosidade das mesmas. Somente as argamassas contaminadas Cd 40, Cr 80 e Zn 160 apresentaram tortuosidades maiores do que as tortuosidades das argamassas de referência.





## 5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa verificou a possibilidade de usar as medidas elétricas como suporte da análise da contaminação de matrizes cimentícias com metais pesados.

Para os metais pesados avaliados, Cd, Pb, Cr e Zn foi demonstrado que os metais pesados influenciaram nas medidas elétricas de impedância.

Por meio dos espectros de impedância foi possível verificar que com o aumento da relação a/c das argamassas de referência, o diâmetro dos arcos de impedância aumentaram aos 28 dias de cura, correspondendo a um aumento da resistência elétrica total das argamassas.

Com a saturação das argamassas após o ensaio de absorção capilar, a avaliação da impedância elétrica após oito dias do ensaio de absorção demonstrou que a água presente nos poros das argamassas diminuiu a resistência elétrica das argamassas. Na análise da impedância realizada 28 dias após o ensaio de absorção verificou-se que a resistência elétrica total das argamassas aumentou em alguns casos.

Ao longo do processo de hidratação das argamassas os ensaios de impedância elétrica demonstraram que houve um aumento da resistência elétrica total das argamassas até os 14 dias de cura e no intervalo entre os 14 e aos 28 dias de cura ocorreu uma pequena diminuição da resistência elétrica.

O pH obtido das amostra líquidas durante os 64 dias de ensaio de tanque apresentaram o mesmo comportamento para todas as argamassas.

Como as argamassas contaminadas apresentaram densidades iguais aos 28 dias de cura, as diferentes porosidades e tortuosidades podem ter sido afetadas pela presença dos metais pesados nas argamassas.

A impedância elétrica diminuiu com o aumento da frequência. Todas as argamassas contaminadas apresentaram permissividade elétrica maior do que a argamassa de referência aos 28 dias de cura.

A impedância elétrica das argamassas durante o ensaio de tanque aumentou com o passar do tempo para as argamassas contaminadas.

A presente pesquisa contribuiu na avaliação da liberação dos elementos químicos do material monolítico submetido ao ensaio de lixiviação e na influência dos metais pesados no processo de hidratação

das argamassas, de acordo com as suas propriedades resistivas e capacitivas.

Enfim, as medidas elétricas detectaram a presença dos metais pesados, principalmente no que tange as propriedades elétricas como a permissividade, a resistência e a capacitância elétrica e refletiram o teor de umidade das argamassas.

## 6 BIBLIOGRAFIA

ABNT – NBR 10005 - Procedimento para Obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos; 2ª Edição; 2004; p.1-16.

ABNT - NBR 10006 – Solubilização de resíduos – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica (2005).

ANDRADE C., BLANCO V. M., COLLAZO A., KEDDAM M., NÓVOA X. R., H. TAKENOUTI. *Cement paste hardening process studied by impedance spectroscopy. Electrochimica Acta*, Volume 44, Ed. 24, Páginas 4313-4318. Madrid, Espanha (1999).

ANTUNES F. C. Condutividade elétrica da solução sólida céria-zircônia dopada com ítrio e gadolínio. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos (2009).

BAN C. C., RAMLI M. *The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. Resources, Conservation and Recycling*. Volume 55, Ed. 7, Páginas 669-685 (2011).

BONEN D., SARKAR S. L. *The effects of simulated environmental attack on immobilization of heavy metals doped in cement-based materials. Journal of Hazardous Materials*. Volume 40, Ed. 3, Páginas 321-335 (1995).

BROWN, R. J. S. *Connection between formation factor for electrical resistivity and fluid-solid coupling factor in Biot's equations for acoustic waves in fluid-filled porous media. Geophysics*, Vol 45, Ed. 8, P. 1269-1275 (1980).

BURLION N., BERNARD D., CHEN D. *X-ray microtomography: Application to microstructure analysis of a cementitious material during leaching process. Cement and Concrete Research.* Volume 36, Páginas 346 – 357 (2006).

CABEZA M., MERINO P., MIRANDA A., NÓVOA X.R., SANCHEZ I. *Impedance spectroscopy study of hardened Portland cement paste. Cement and Concrete Research,* Volume 32, Ed. 6, Páginas 881-891 (2002).

CABEZA M., KEDDAM M., NÓVOA X. R., SÁNCHEZ I., TAKENOUTI H. *Impedance spectroscopy to characterize the pore structure during the hardening process of Portland cement paste. Electrochimica Acta.* Volume 51, Páginas 1831–1841, (2006).

CAO J. e CHUNG D. D. L. *Electric polarization and depolarization in cement-based materials, studied by apparent electrical resistance measurement. Cement and Concrete Research,* Volume 34, Páginas 481–485, (2004).

CHAI J., ONITSUK K., HAYASHI S. *Cr(VI) concentration from batch contact/tank leaching and column percolation test using fly ash with additives. Journal of Hazardous Materials.* Volume 166, Ed. 1, Páginas 67-73 (2009).

CHEN Q.Y., HILLS C.D., TYRER M., SLIPPER I., SHEN H.G., BROUGH A. *Characterisation of products of tricalcium silicate hydration in the presence of heavy metals. Journal of Hazardous Materials.* Volume 147, Páginas 817 – 825 (2007).

CHEN Q.Y., TYRER M., HILLS C.D., YANG X.M., CAREY P. *Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: A review. Waste Management.* Volume 29, Ed. 1, Páginas 390-403 (2009).

COLEMAN, G. R. *The use of electrical moisture meters.* 1999.

CONNER, J. R. *Chemical fixation and solidification of Hazardous Wastes. Journal of Hazardous Materials,* Volume 30, Ed. 1, 107-108 (1990).

DOTELLI G., MARI C. M. *The evolution of cement paste hydration process by impedance spectroscopy. Materials Science and Engineering*. A303 Páginas 54–59. Itália (2001).

EA NEN 7375 - *Leaching characteristics of moulded or monolithic building and waste materials. Determination of leaching of inorganic components with the diffusion test. Netherlands Normalisation Institute Standard* (2004).

GARBALINSKA H., KOWALSKI S. J., STASZAK M. *Linear and non-linear analysis of desorption processes in cement mortar. Cement and Concrete Research*. Volume 40, Ed. 5, Páginas 752-762 (2010).

GARROUCH Ali. A., ALI L., e QASEM F. *Using Diffusion and Electrical Measurements to Assess Tortuosity of Porous Media. Ind. Eng. Chem. Res.* Volume 40, Páginas 4363-4369 (2001).

GEVEN, T. V.; BAELEN, D. V.; DUTRÉ, V. e VANDECASTEL, C. *Influence of carbonation and carbonation methods on leaching of metals from mortars. Cement and Concrete Research*, Volume 34, Ed. 1, Páginas 149-156 (2003).

GIERGICZNY Z., KRÓL A. *Immobilization of heavy metals (Pb, Cu, Cr, Zn, Cd, Mn) in the mineral additions containing concrete composites. Journal of Hazardous Materials*. Volume 160, Ed. 2-3, Páginas 247-255 (2008).

GINEYS N., AOUAD G., DAMIDOT D. *Managing trace elements in Portland cement – Part I: Interactions between cement paste and heavy metals added during mixing as soluble salts. Cement & Concrete Composites*. Vol. 32. 563-570 (2010).

GOUAL M. S., BALI A., BARQUIN F. de, DHEILLY R. M., QUÉNEUDEC M. *Isothermal moisture properties of Clayey Cellular Concretes elaborated from clayey waste, cement and aluminium powder. Cement and Concrete Research*. Volume 36, Ed. 9, Páginas 1768-1776 (2006).

GROOT G., SLOOT van der H. *Determination of leaching characteristics of waste materials loading to environmental product*

*certification. Stabilization and solidification of hazardous, radioactive, and mixed wastes.* Volume 2, Páginas 149-170 (1992).

GU P., XIE P., BEAUDOIN J. J., BROUSSEAU R. A.C. *IMPEDANCE SPECTROSCOPY (I): A New Equivalent Circuit Model for Hydrated Portland Cement Paste.* *Cement and Concrete Research.* Vol. 22, pp. 833-840, (1992).

HALIM, C. E.; AMAL, R.; BEYDOUN, D.; SCOTT, J. A. e LOW, G. *Implication of structure of cimentitious wastes containing Pb (II), Cd (II), As (V), and Cr (VI) on the leaching of metals.* *Cement and Concrete Research,* Volume 34, Ed. 7, Páginas 1093-1102 (2003).

JANUSA M. A., CHAMPAGNE C. A., FANGUY J. C., HEARD G. E., LAINE P. L., LANDRY A. A. *Solidification/stabilization of lead with the aid of bagasse as an additive to Portland cement.* *Microchemical Journal.* Volume 65, Ed. 3, Páginas 255-259 (2000).

KIM Y. M., LEE J. H., HONG S. H. *Study of alinite cement hydration by impedance spectroscopy.* *Cement and Concrete Research.* Volume 33, Ed. 3, Páginas 299-304, março (2003).

LIAO Y., WEI X., LI G. *Early hydration of calcium sulfoaluminate cement through electrical resistivity measurement and microstructure investigations.* *Construction and Building Materials.* Volume 25, Ed. 4, Páginas 1572-1579 (2011).

MALVIYA, R. e CHAUDHARY, R. *Evaluation of Leaching characteristics and environmental compatibility os solidified/stabilized products.* *Journal of Hazardous Materials.* Páginas 207–217 (2006).

MARTYS, N. S., FERRARIS, C. F. *Capillary transport in mortars and concrete.* *Cement and Concrete Research,* Volume 27, Ed. 5, Páginas 747-760 (1997).

MESQUITA, L. P. Avaliação da fixação de metais pesados em matrizes cimentícias. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina (2008).

MURAT, M. e SORRENTINO, F. *Effect of large additions of Cd, Pb, Cr, Zn, to cement raw meal on the composition and the properties of the clinker and the cement. Cement and Concrete Research*, Volume 26, Ed. 3, Páginas 377-385 (1996).

NEITHALATH, N.; WEISS, J.; OLEK, J. *Characterizing Enhanced Porosity Concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance. Cement and Concrete Research* 36 (2006) 2074–2085.EUA.

PALOMO, A. e PALACIOS, M. *Alkali – activated cementitious materials: Alternative matrices for the immobilization of hazardous wastes. Part II. Stabilization of chromium and lead* (2002).

PARK, C. K. *Hydration and solidification of hazardous wastes containing heavy metals using modified cementitious materials.* (2002).

POON, C. S. e LIO K. W. *The limitation of the toxicity-characteristic leaching procedure for evaluating cement-based stabilized/solidified waste forms.* Hong Kong, 1997.

PROMENTILLA M. A. B., SUGIYAMA T., HITOMI T., TAKEDA N. *Quantification of tortuosity in hardened cement pastes using synchrotron-based X-ray computed microtomography. Cement and Concrete Research.* Volume 39, Ed. 6, Páginas 548-557 (2009).

PUERTAS F., GARCÍA-DÍAZ I., BARBA A., GAZULLA M. F., PALACIOS M., GÓMEZ M. P., MARTÍNEZ-RAMÍREZ S. *Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. Cement and Concrete Composites.* Volume 30, Ed. 9, Páginas 798-805 (2008).

SALTAS V., VALLIANATOS F., SOUPIO P., MAKRIS J. P., TRIANTIS D. *Dielectric and conductivity measurements as proxy method to monitor contamination in sandstone. Journal of Hazardous Materials.* Páginas 520-525. (2007).

SCHAEFFER C. O. *Avaliação dos metais pesados presentes nos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) e influência no potencial de lixiviação de matrizes cimentícias.*

Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina (2007).

SHI C., ZHENG K. *A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. Resources, Conservation and Recycling.* Volume 52, Ed. 2, Páginas 234-247 (2007).

STEPHAN D., MALLMANN R., KNÖFELB D., HÄRDTLA R. *High intakes of Cr, Ni, and Zn in clinker Part II. Influence on the hydration properties. Cement and Concrete Research.* Volume 29, páginas 1959–1967(1999).

TOWNSEND T., JANG Y. C. E TOLAYMAT T. *Leaching Tests for Evaluating Risk in Solid Waste Management Decision Making.* Universidade da Flórida (2002).

TOWNSEND T., JANG Y. C., TOLAYMAT T. *A Guide to the Use of Leaching Tests in Solid Waste Management Decision Making. The Florida Center for Solid and Hazardous Waste.* Universidade da Flórida (2003).

TUMIDAJSKI P. J. *Electrical conductivity of Portland cement mortars. Cement and Concrete Research.* Volume 26, Ed. 4, Páginas 529-534 (1996).

TUMIDAJSKI P. J. *Relationship between resistivity, diffusivity and microstructural descriptors for mortars with silica fume. Cement and Concrete Research.* Volume 35, Ed. 7, Páginas 1262-1268 (2005).

*US EPA Method 1311 - Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (2001).

WANG, S. e VIPULANANDAN, C. *Solidification/Stabilization of Cr (VI) with cement Leachability and XRD analyses.* (1999). University of Houston, Houston, USA.

XIE P., GU P., FU Y., BEAUDOIN J.J. *A.C. impedance phenomena in hydrating cement systems: Detectability of the high frequency arc. Cement and Concrete Research.* Vol. 24, pp. 92-94, (1994).



XU G., BEAUDOIN J. J., JOLICOEUR C., PAGÉ M. *The effect of a polynaphthalene sulfonate superplasticizer on the contribution of the interfacial transition zone to the electrical resistivity of mortars containing silica and limestone fine aggregate*. *Cement and Concrete Research*. Volume 30, Ed. 5, Páginas 683-691(2000).

ZHANG H., HE P. J., SHAO L. M. *Implication of heavy metals distribution for a municipal solid waste management system — a case study in Shanghai*. *Science of the total environment*. 402 (2008) 257 – 267. China.



## **APÊNDICES**

## APÊNDICE 1 - Tabelas com as concentrações de todos os elementos químicos liberados durante o ensaio de tanque.

REFERÊNCIA 0,40																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	6,528	3,032	0,000	0,000	9,539	2,972	0,000	0,000	11,097	2,977	5,442	2,875	7,680	2,688	8,366	2,653
Ca	76,553	66,111	0,000	0,000	110,661	57,190	177,697	60,190	70,918	64,699	317,725	17,608	0,000	0,000	115,879	51,132
Cd	0,000	0,000	18,979	5,338	20,826	4,517	17,077	4,657	20,502	5,103	22,527	5,232	15,610	3,980	0,000	0,000
Co	15,453	6,782	32,352	6,717	0,000	0,000	0,000	0,000	14,175	6,665	14,659	6,977	19,918	5,520	10,776	5,993
Cr	24,798	12,517	25,131	12,731	0,000	0,000	35,789	12,131	47,526	11,687	34,553	14,022	42,480	11,226	49,264	12,248
Cu	42,028	4,619	24,092	4,503	28,750	4,424	25,100	4,544	33,759	4,464	35,152	4,562	28,057	4,056	22,047	4,064
Fe	25,232	7,934	40,479	7,784	35,734	8,119	37,865	8,163	36,750	7,714	40,111	8,076	29,497	7,262	33,518	7,068
Mn	25,915	9,914	30,977	9,986	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ni	19,215	5,642	16,144	5,360	20,473	4,868	9,552	4,998	21,989	5,531	0,000	0,000	0,000	0,000	7,161	4,405
Pb	39,235	8,785	29,724	8,545	27,951	8,608	13,274	8,691	0,000	0,000	15,701	8,725	33,140	7,673	30,926	7,584
Rb	9,082	2,244	8,863	2,451	0,000	0,000	0,000	0,000	8,462	2,372	0,000	0,000	8,543	2,187	11,930	2,153
Sr	4,370	2,276	7,983	2,254	5,684	2,041	0,000	0,000	3,465	2,176	9,498	2,296	6,301	2,017	11,293	1,998
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	0,000	0,000	31,145	16,954	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn	22,161	4,008	9,232	3,832	15,314	3,863	15,114	3,929	16,573	3,829	13,479	3,938	20,060	3,500	13,813	3,565
pH =	11,725		11,781		11,587		11,881		11,605		11,774		11,834		11,125	
$\sigma$ (mS/cm) =	640,9		722,0		471,6		817,9		427,5		690,0		823,4		655,1	
$\sigma^*$ (mS.cm <sup>2</sup> ) =	128180,0		144400,0		94320,0		163580,0		85500,0		138000,0		164680,0		131020,0	
n (g) / d (kg/m <sup>3</sup> ) =	425,4 2166,5		426,1		426,3		426,8		427,0		427,1		427,4		427,8	

REFERÊNCIA 0,50																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	6,633	2,927	0,000	0,000	8,901	2,933	0,000	0,000	9,755	2,933	7,282	2,892	3,466	2,653	0,000	0,000
Ca	90,899	60,862	160,762	61,062	84,812	62,365	112,571	57,433	213,814	16,348	247,576	17,288	185,319	53,475	298,870	18,397
Cd	12,928	4,717	0,000	0,000	11,829	5,157	18,203	4,992	24,143	5,080	12,246	4,231	0,000	0,000	10,259	4,900
Co	13,611	5,794	21,846	6,358	0,000	0,000	11,659	6,417	0,000	0,000	0,000	0,000	11,297	6,294	26,261	6,481
Cr	33,226	12,175	27,857	12,384	45,981	11,814	30,905	13,005	13,010	11,370	13,732	12,755	20,777	12,984	32,698	12,383
Cu	30,383	4,367	30,113	4,324	26,490	4,255	36,965	4,538	39,775	4,405	14,229	4,383	33,935	4,248	40,606	4,342
Fe	30,373	7,570	55,460	7,809	42,493	7,868	41,437	7,975	13,631	7,579	51,876	7,879	44,506	7,542	41,663	7,383
Mn	26,988	9,360	28,121	9,373	0,000	0,000	41,282	10,440	33,493	9,322	30,986	10,058	0,000	0,000	46,834	9,930
Ni	9,639	4,578	0,000	0,000	0,000	0,000	12,405	5,225	8,774	5,194	0,000	0,000	0,000	0,000	13,679	4,647
Pb	23,169	8,321	28,708	8,222	18,059	8,623	0,000	0,000	9,310	8,249	26,032	8,310	26,675	7,899	12,838	5,464
Rb	6,182	2,355	8,590	2,350	0,000	0,000	4,635	2,330	6,372	2,364	0,000	0,000	0,000	0,000	6,337	2,362
Sr	0,000	0,000	6,708	2,158	8,036	2,249	3,441	2,162	7,109	2,164	7,440	2,187	0,000	0,000	12,208	1,988
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	0,000	0,000	24,945	14,546	0,000	0,000	26,577	17,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn	20,388	3,798	18,465	3,763	13,091	3,654	14,075	3,911	16,295	3,796	4,095	3,792	11,988	3,622	21,047	3,767
pH =	11,778		11,817		11,63		11,999		11,724		11,84		11,751		10,972	
$\sigma$ (mS/cm) =	743,3		806,8		543,1		963,8		535,7		721,5		708,5		491,6	
$\sigma^*$ (mS.cm <sup>2</sup> ) =	148660,0		161360,0		108620,0		192760,0		107140,0		144300,0		141700,0		98320,0	
n (g) / d (kg/m <sup>3</sup> ) =	423,6	2157,4	424,2		424,5		425		425,1		425,3		425,9		426,2	

Apêndices

REFERÊNCIA 0,60																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	6,456	2,976	9,416	3,001	0,000	0,000	0,000	0,000	5,966	2,988	0,000	0,000	0,000	0,000	5,603	2,784
Ca	166,835	62,668	125,018	62,317	147,088	56,780	145,994	60,773	324,417	68,252	242,693	17,024	258,691	17,544	120,340	51,369
Cd	21,404	5,220	0,000	0,000	0,000	0,000	18,006	4,349	6,084	5,344	19,646	4,482	15,032	4,648	12,379	4,604
Co	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,917	6,095	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	15,450	5,805
Cr	19,997	12,413	26,552	11,210	0,000	0,000	49,826	11,966	29,892	12,714	0,000	0,000	21,935	10,419	0,000	0,000
Cu	27,304	4,432	35,538	4,544	32,370	4,073	37,872	4,218	35,628	4,617	30,257	4,424	39,719	4,202	36,251	4,287
Fe	30,030	8,097	8,570	7,691	34,815	7,630	43,050	7,770	22,255	7,664	35,283	7,677	36,009	7,206	30,682	7,616
Mn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	37,149	9,517	22,577	9,356	0,000	0,000	21,651	9,623
Ni	6,523	5,212	13,382	4,984	10,890	5,045	11,190	5,007	0,000	0,000	8,677	5,080	13,505	5,085	13,138	5,424
Pb	18,458	8,659	27,485	8,561	23,387	8,159	0,000	0,000	41,675	8,542	21,212	8,124	15,771	7,886	34,950	8,169
Rb	0,000	0,000	8,325	2,445	0,000	0,000	9,734	2,346	0,000	0,000	11,848	2,343	9,351	2,249	8,827	2,288
Sr	5,524	2,251	5,160	2,129	8,498	2,151	5,481	2,148	5,972	2,237	5,832	2,116	0,000	0,000	5,236	2,091
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn	0,000	0,000	17,258	3,841	7,118	3,547	16,085	3,751	8,420	3,620	10,668	3,605	15,112	3,552	15,709	3,776
<b>pH =</b>	11,829		11,847		11,636		11,99		11,612		11,869		11,857		11,223	
<b>σ (mS/cm) =</b>	827,4		851,7		514,1		904,8		606,5		764,4		803,2		614,7	
<b>σ* (mS.cm<sup>2</sup>) =</b>	165480,0		170340,0		102820,0		180960,0		121300,0		152880,0		160640,0		122940,0	
<b>n (g) / d (kg/m<sup>3</sup>) =</b>	421,4	2146,2	421,8		422,1		422,5		422,7		422,8		423,3		423,4	

Cd 20																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	13,238	3,096	6,091	2,857	0,000	0,000	11,740	3,016	6,769	2,972	9,399	2,816	7,471	2,709	7,417	2,719
Ca	455,079	18,728	223,226	64,511	261,628	17,568	192,770	58,753	65,929	60,455	295,557	17,716	381,096	17,728	218,232	54,404
Cd	14,926	5,464	0,000	0,000	11,628	5,028	11,600	4,929	32,954	5,568	15,759	5,026	18,933	4,108	17,080	4,633
Co	19,297	6,736	8,540	6,558	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	18,436	5,442
Cr	22,596	12,563	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	41,725	12,159	20,952	12,143	30,366	12,376
Cu	25,954	4,636	21,968	4,385	26,677	4,249	30,269	4,578	39,174	4,486	40,822	4,317	34,288	4,217	30,202	4,155
Fe	39,871	8,174	24,510	7,353	40,952	7,968	31,613	8,018	24,685	7,918	24,104	7,482	29,279	6,858	21,076	7,145
Mn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	26,404	8,918
Ni	7,198	5,837	14,526	4,718	0,000	0,000	12,677	5,233	9,985	5,422	17,490	5,222	0,000	0,000	17,782	4,632
Pb	33,930	8,657	0,000	0,000	9,655	8,478	0,000	0,000	0,000	0,000	25,066	8,122	17,671	7,755	23,485	7,850
Rb	6,887	2,464	6,963	2,331	8,470	2,447	6,033	2,453	4,379	2,303	6,599	2,331	0,000	0,000	5,946	2,224
Sr	6,332	2,284	0,000	0,000	0,000	0,000	10,869	2,255	5,771	2,019	6,493	2,152	0,000	0,000	6,183	2,042
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	34,835	14,471
Zn	24,570	4,055	15,029	3,775	6,838	3,653	8,114	3,891	15,949	3,816	11,202	3,696	0,000	0,000	19,313	3,638
pH =	11,905		11,897		11,657		12,044		11,802		11,949		12,024		11,334	
$\sigma$ (mS/cm) =	995,8		973,2		559,1		1078		748,6		892,5		1137,2		771,7	
$\sigma^*$ (mS.cm <sup>2</sup> ) =	199160,0		194640,0		111820,0		215600,0		149720,0		178500,0		227440,0		154340,0	
n (g) / d (kg/m <sup>3</sup> ) =	422,1	2149,7	422,8		422,9		423,5		423,5		423,7		424		424,1	

Cd 40																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	9,046	3,007	0,000	0,000	8,319	2,842	5,587	2,933	0,000	0,000	11,866	2,936	0,000	0,000	7,443	2,665
Ca	265,022	67,666	112,763	58,071	141,371	55,097	0,000	0,000	300,586	17,563	410,451	18,595	492,500	19,249	440,114	18,612
Cd	5,485	4,344	18,247	4,845	7,975	5,051	11,187	5,506	13,779	4,722	8,714	5,229	18,728	4,832	8,878	4,453
Co	0,000	0,000	0,000	0,000	11,671	6,893	0,000	0,000	0,000	0,000	14,013	6,483	0,000	0,000	0,000	0,000
Cr	21,094	12,448	0,000	0,000	16,843	12,932	13,496	4,338	30,648	11,967	50,698	12,828	22,679	12,269	18,510	11,946
Cu	38,697	4,554	34,629	4,364	0,000	0,000	37,538	4,478	26,394	4,252	23,508	4,404	21,368	4,005	25,986	4,086
Fe	29,118	7,928	29,651	7,482	27,927	7,782	26,115	7,860	0,000	0,000	48,079	7,659	38,485	7,267	50,021	7,571
Mn	13,884	9,453	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	18,192	9,226
Ni	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	23,862	5,495	11,861	4,719	11,652	5,233	0,000	0,000	14,112	5,158
Pb	0,000	0,000	17,240	8,185	18,628	8,525	0,000	0,000	16,239	8,047	24,406	8,400	11,632	7,749	29,547	7,766
Rb	4,369	2,429	0,000	0,000	5,105	2,427	7,976	2,454	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	9,155	2,227
Sr	10,963	2,244	0,000	0,000	4,241	2,222	0,000	0,000	0,000	0,000	5,825	2,150	0,000	0,000	7,043	1,930
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	27,523	14,057
Zn	17,822	3,959	22,356	3,701	7,150	3,848	22,002	3,928	18,411	3,706	6,511	3,741	10,725	3,536	13,238	3,602
pH =	11,818		11,873		11,657		12,05		11,607		11,936		12,103		11,476	
$\sigma$ (mS/cm) =	846,7		1009,3		590		1051,6		499,7		922,4		1233,9		942,1	
$\sigma^*$ (mS.cm <sup>2</sup> ) =	169340,0		201860,0		118000,0		210320,0		99940,0		184480,0		246780,0		188420,0	
n (g) / d (kg/m <sup>3</sup> ) =	424,1	2159,9	425,1		425,4		425,8		425,8		425,8		426,1		426,3	



Cd 80																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	6,039	2,886	8,504	2,656	0,000	0,000	6,595	2,933	5,273	2,833	0,000	0,000	4,239	2,859	7,151	2,757
Ca	43,799	62,740	135,113	55,669	429,303	18,700	117,343	63,223	258,393	16,552	343,660	17,671	1124,672	24,023	137,722	49,526
Cd	11,117	4,313	5,925	4,842	9,712	4,851	15,118	5,401	18,919	4,812	9,233	4,332	16,212	5,138	22,892	4,800
Co	17,806	6,099	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,930	5,756	0,000	0,000	0,000	0,000
Cr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,564	13,131	32,147	11,640	33,231	13,264	36,403	12,259	0,000	0,000
Cu	25,536	4,135	30,215	4,263	35,999	4,370	10,358	4,460	37,244	4,275	31,833	4,337	23,732	4,343	41,431	4,175
Fe	24,669	7,649	17,983	6,946	32,660	7,617	22,622	7,845	48,244	7,764	9,519	7,621	46,136	7,671	23,188	7,197
Mn	18,450	9,292	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	34,577	9,418
Ni	5,296	5,011	8,042	5,263	14,711	5,376	8,978	5,529	9,522	4,572	15,712	4,664	12,373	5,267	11,545	4,922
Pb	0,000	0,000	0,000	0,000	25,619	8,242	37,755	8,595	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	43,608	7,864
Rb	0,000	0,000	7,159	2,130	11,344	2,369	7,377	2,450	3,555	2,306	8,013	2,300	0,000	0,000	6,199	2,214
Sr	11,786	2,090	6,598	2,144	7,157	1,991	6,229	2,276	4,197	2,144	9,645	2,138	0,000	0,000	0,000	0,000
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn	10,879	3,726	12,433	3,689	18,058	3,712	0,000	0,000	11,013	3,755	12,732	3,705	17,224	3,754	15,235	3,497
pH =	11,804		11,895		11,709		12,01		11,634		11,73		11,789		9,65	
$\sigma$ (mS/cm) =	801		865,6		620,4		1002,7		474,4		646,8		689,6		315,9	
$\sigma^*$ (mS.cm <sup>2</sup> ) =	160200,0		173120,0		124080,0		200540,0		94880,0		129360,0		137920,0		63180,0	
n (g) / d (kg/m <sup>3</sup> ) =	419,4	2136,0	420,3		420,7		421,1		421,2		421,3		421,6		422,1	

Cd 160																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	11,143	2,906	0,000	0,000	6,212	2,950	0,000	0,000	0,000	0,000	7,151	2,809	6,047	2,848	9,801	2,821
Ca	190,981	62,309	256,808	64,450	0,000	0,000	75,875	63,544	185,072	54,898	204,798	56,014	481,893	19,459	703,475	20,957
Cd	7,797	5,250	7,510	5,146	9,253	4,414	11,796	5,286	16,647	4,315	23,178	5,298	10,033	4,249	16,511	4,674
Co	11,019	6,310	0,000	0,000	0,000	0,000	8,857	6,856	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	13,397	5,603
Cr	23,584	11,417	0,000	0,000	0,000	0,000	17,475	13,601	0,000	0,000	15,904	12,516	0,000	0,000	36,399	12,375
Cu	35,137	4,412	29,208	4,493	23,874	4,382	29,896	4,421	36,799	4,264	17,232	4,219	37,089	4,235	37,593	4,305
Fe	56,020	7,502	27,823	7,422	18,029	7,559	23,474	7,600	39,043	7,541	36,726	7,149	43,597	7,706	30,112	7,312
Mn	37,396	9,931	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	21,293	9,031	0,000	0,000	0,000	0,000	24,289	9,447
Ni	13,665	5,318	0,000	0,000	0,000	0,000	7,075	5,307	16,491	5,235	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Pb	22,512	8,342	18,920	8,483	27,388	8,395	0,000	0,000	15,149	8,100	0,000	0,000	27,435	8,115	33,602	8,197
Rb	11,346	2,381	0,000	0,000	0,000	0,000	3,641	2,425	7,653	2,305	0,000	0,000	0,000	0,000	8,258	2,330
Sr	9,662	2,193	0,000	0,000	4,847	2,199	9,183	2,238	8,416	2,147	3,868	2,146	3,770	2,140	5,098	2,125
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	99,000	21,882	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	23,463	15,319	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn	18,418	3,804	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	19,809	3,700	14,488	3,688	20,793	3,790	21,452	3,779
pH =	11,396		11,904		11,745		12,013		11,82		11,937		12,049		11,253	
$\sigma$ (mS/cm) =	700,7		901,9		652,5		964,7		635,6		805,4		1097		700	
$\sigma^*$ (mS.cm <sup>2</sup> ) =	140140,0		180380,0		130500,0		192940,0		127120,0		161080,0		219400,0		140000,0	
m (g) / d (kg/m <sup>3</sup> ) =	420,1 2139,6		420,8		421,5		421,5		421,7		421,8		422,1		422,4	

Apêndices

Cr 20																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	5,920	2,766	6,804	2,872	8,837	2,894	5,439	2,902	6,272	2,852	6,073	2,918	4,028	2,815	9,435	2,963
Ca	120,943	56,654	74,820	58,859	72,009	60,600	219,673	65,624	0,000	0,000	277,581	64,573	547,253	19,797	795,556	21,645
Cd	10,443	3,975	14,866	4,270	0,000	0,000	13,274	4,550	0,000	0,000	14,999	4,427	13,078	4,715	10,431	4,931
Co	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,083	6,649	26,740	6,042	0,000	0,000
Cr	27,157	11,531	21,270	12,248	21,576	13,110	26,343	12,058	36,044	10,981	23,351	12,875	30,213	10,971	57,118	12,266
Cu	35,542	4,206	34,450	4,275	35,694	4,124	30,823	4,491	34,846	4,297	30,708	4,470	37,226	4,239	40,799	4,530
Fe	34,314	7,529	19,768	7,583	24,411	7,547	25,318	7,840	34,273	7,427	22,275	7,989	16,200	7,400	29,920	7,703
Mn	27,720	9,105	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ni	0,000	0,000	0,000	0,000	10,031	4,829	12,449	4,988	11,056	5,134	7,818	5,444	9,410	5,296	0,000	0,000
Pb	13,743	7,830	0,000	0,000	0,000	0,000	27,762	8,538	25,090	8,201	30,379	8,445	29,322	8,097	25,997	8,464
Rb	0,000	0,000	4,121	2,319	10,315	2,333	3,640	2,433	3,877	2,305	0,000	0,000	5,146	2,271	5,742	2,397
Sr	0,000	0,000	0,000	0,000	11,214	2,151	0,000	0,000	9,836	2,155	7,821	2,209	10,045	2,121	9,160	2,261
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn	16,043	3,661	0,000	0,000	0,000	0,000	14,206	3,848	12,058	3,722	0,000	0,000	0,000	0,000	21,737	3,865
pH =	11,544		11,83		11,619		11,948		11,436		11,822		12,003		11,208	
$\sigma$ (mS/cm) =	694,7		770,1		525,2		833,2		433,7		721,1		1018,9		689,8	
$\sigma^*$ (mS.cm <sup>2</sup> ) =	138940,0		154020,0		105040,0		166640,0		86740,0		144220,0		203780,0		137960,0	
n (g) / d (kg/m <sup>3</sup> ) =	418,5	2131,4	418,8		419,1		419,5		419,8		420		420,5		420,8	

Cr 40																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	4,055	2,586	14,558	3,007	10,214	2,965	7,390	2,990	0,000	0,000	5,870	2,735	5,154	2,748	9,270	2,761
Ca	263,213	16,464	136,782	61,632	175,189	62,471	270,762	17,322	268,318	53,149	265,605	61,248	991,709	22,948	265,593	17,064
Cd	5,074	4,520	12,911	5,258	0,000	0,000	15,434	4,555	7,232	5,037	0,000	0,000	10,158	4,942	25,804	4,726
Co	0,000	0,000	10,319	6,566	8,107	6,702	22,093	6,683	0,000	0,000	0,000	0,000	9,116	6,218	21,434	6,255
Cr	16,559	11,564	21,253	12,413	21,834	13,246	35,764	13,308	45,562	12,748	15,001	11,784	22,843	12,102	30,031	12,258
Cu	30,026	3,955	34,215	4,467	26,266	4,416	27,225	4,521	34,076	4,346	20,211	4,231	29,862	4,107	29,528	4,104
Fe	21,557	6,918	13,537	7,707	29,231	7,812	37,104	7,718	51,546	7,766	21,994	7,287	31,276	7,310	48,203	7,396
Mn	22,417	8,132	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	15,456	9,222	0,000	0,000	17,494	9,347	33,970	9,450
Ni	12,336	4,849	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	16,097	4,727	0,000	0,000	9,263	5,251	18,665	5,115
Pb	17,565	7,323	17,604	8,398	0,000	0,000	40,111	8,640	22,475	8,313	19,614	7,990	10,565	7,740	22,408	7,903
Rb	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,076	2,453	4,750	2,323	4,749	2,239	6,809	2,214	6,358	2,250
Sr	5,268	1,872	0,000	0,000	10,252	2,170	7,744	2,266	11,617	2,199	8,589	2,066	8,260	2,035	10,878	2,083
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	22,502	20,361	0,000	0,000
V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn	14,853	3,416	0,000	0,000	0,000	0,000	16,145	3,837	11,205	3,786	16,918	3,653	14,767	3,646	14,381	3,509
<b>pH =</b>	11,622		11,853		11,748		11,977		11,766		11,879		12,016		11,27	
<b>σ (mS/cm) =</b>	783,5		822,4		577,8		909,6		631,3		771,6		970,2		651,3	
<b>σ* (mS.cm²) =</b>	156700,0		164480,0		115560,0		181920,0		126260,0		154320,0		194040,0		130260,0	
<b>m (g) / d (kg/m³) =</b>	421,9 2148,7		422,5		422,7		423,1		423,5		423,6		424,1		424,4	

Cr 80																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	6,726	2,645	5,077	2,938	12,528	2,724	7,128	2,874	11,860	3,013	0,000	0,000	4,363	2,803	9,264	2,826
Ca	520,523	19,105	125,200	53,434	0,000	0,000	246,038	64,520	116,345	64,206	125,443	55,007	901,908	21,951	935,460	22,375
Cd	16,472	4,446	8,960	5,245	13,862	4,599	14,722	5,376	0,000	0,000	18,615	5,259	13,046	4,744	11,148	4,666
Co	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,215	6,606	0,000	0,000	15,363	6,363	12,786	5,901
Cr	0,000	0,000	0,000	0,000	22,266	12,745	40,280	12,874	40,583	13,404	23,368	12,204	25,299	12,146	27,184	10,574
Cu	8,492	3,822	28,206	4,443	25,377	4,492	35,052	4,321	7,615	4,614	44,519	4,516	33,852	4,361	33,480	4,330
Fe	25,626	7,189	25,699	7,622	0,000	0,000	43,577	7,583	35,553	8,134	0,000	0,000	37,957	7,440	28,448	7,004
Mn	15,646	8,756	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	29,524	9,211	0,000	0,000	19,687	9,634	24,037	9,958
Ni	11,929	4,746	0,000	0,000	0,000	0,000	18,278	4,703	0,000	0,000	0,000	0,000	10,150	5,023	0,000	0,000
Pb	10,889	7,576	33,998	8,552	0,000	0,000	0,000	0,000	30,924	8,717	11,205	8,423	23,350	8,115	0,000	0,000
Rb	0,000	0,000	11,043	2,367	3,969	2,429	0,000	0,000	8,371	2,509	6,453	2,409	11,947	2,331	5,983	2,282
Sr	3,990	1,994	6,453	2,142	6,391	2,248	0,000	0,000	9,393	2,314	6,657	2,216	11,616	2,129	4,822	2,117
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	33,324	14,462	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	26,059	17,390	0,000	0,000	20,690	16,657	0,000	0,000
Zn	8,518	3,381	8,086	3,898	15,075	3,912	0,000	0,000	18,781	3,978	17,969	3,829	11,663	3,712	16,195	3,670
<b>pH =</b>	11,736		11,867		11,771		11,983		11,803		11,962		12,054		11,416	
<b>σ (mS/cm) =</b>	776,9		803,6		597,8		936,2		737,9		892,4		1053,1		830,7	
<b>σ* (mS.cm<sup>2</sup>) =</b>	155380,0		160720,0		119560,0		187240,0		147580,0		178480,0		210620,0		166140,0	
<b>n (g) / d (kg/m<sup>3</sup>) =</b>	421,5		2146,7		422,3		422,6		423		423,1		423,2		723,5	

Apêndices

Cr 160																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	0,00	0,00	4,756	2,823	9,362	3,008	8,935	2,672	6,237	2,975	11,650	2,678	5,526	2,628	8,751	2,795
Ca	259,56	16,84	233,093	59,523	129,665	60,380	146,421	65,290	263,604	17,801	289,909	17,326	1599,459	26,518	496,631	19,075
Cd	0,00	0,00	0,000	0,000	10,531	5,393	0,000	0,000	10,724	4,968	0,000	0,000	14,797	4,727	11,698	4,685
Co	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cr	0,00	0,00	34,921	10,877	0,000	0,000	42,784	13,410	0,000	0,000	26,806	12,985	13,354	9,629	37,817	12,595
Cu	28,64	4,04	32,072	4,301	28,333	4,400	16,737	4,421	36,127	4,440	20,375	4,394	31,472	4,098	34,011	4,295
Fe	32,17	7,17	20,780	7,483	14,869	7,848	40,715	7,386	15,433	7,843	49,865	7,925	21,648	7,103	32,408	7,467
Mn	34,60	8,57	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,349	9,229	24,594	9,550
Ni	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	16,838	5,194	12,282	4,834	13,454	5,490	9,075	4,962	12,877	4,771
Pb	0,00	0,00	0,000	0,000	30,254	8,625	0,000	0,000	32,064	7,450	14,171	8,486	22,012	7,661	39,522	8,032
Rb	6,97	2,05	6,991	2,334	3,304	2,317	9,805	2,440	5,513	2,446	6,152	2,425	0,000	0,000	0,000	0,000
Sr	6,62	1,88	6,769	2,152	0,000	0,000	7,663	2,250	6,361	2,251	3,847	2,232	7,021	1,998	8,587	2,120
Ti	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	73,600	21,910	0,000	0,000
V	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	43,327	16,184	33,982	14,842
Zn	17,24	3,56	6,451	3,740	16,618	3,857	16,249	3,869	11,644	3,763	19,444	3,860	10,472	3,514	18,498	3,756
pH =	11,639		11,849		11,632		11,937		11,751		11,872		11,909		11,238	
$\sigma$ (mS/cm) =	752,6		851,6		554,4		872,9		607		736,5		873,6		682,1	
$\sigma^*$ (mS.cm <sup>2</sup> ) =	150520,0		170320,0		110880,0		174580,0		121400,0		147300,0		174720,0		136420,0	
m (g) / d (kg/m <sup>3</sup> ) =	423,2	2155,3	423,8		424,2		424,8		425,1		425,3		425,8		426,2	

Pb 20																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	9,594	2,570	5,459	2,940	7,556	3,111	5,866	2,824	7,456	2,928	0,000	0,000	4,086	2,750	9,333	2,756
Ca	201,935	57,092	118,058	64,065	439,742	18,700	491,389	19,016	284,338	18,581	279,393	17,082	1791,550	27,872	151,565	49,238
Cd	8,907	3,771	0,000	0,000	24,964	5,439	17,802	5,045	24,028	5,109	13,767	5,487	9,591	4,550	9,205	4,876
Co	10,470	5,903	12,725	6,640	0,000	0,000	25,535	6,755	17,285	6,761	8,633	6,619	7,589	5,517	0,000	0,000
Cr	16,529	11,827	29,502	13,486	47,656	11,671	0,000	0,000	32,084	12,759	0,000	0,000	16,166	11,632	0,000	0,000
Cu	17,702	3,923	40,239	4,518	30,195	4,460	31,364	4,567	26,406	4,406	20,564	4,466	36,772	4,228	37,970	4,168
Fe	12,342	6,838	33,813	7,935	30,325	8,134	15,694	7,564	36,453	8,048	41,529	8,019	11,018	7,057	36,136	7,552
Mn	0,000	0,000	0,000	0,000	35,034	10,572	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	41,748	9,586	23,845	9,297
Ni	0,000	0,000	21,517	5,503	0,000	0,000	7,864	4,870	16,786	5,631	0,000	0,000	11,887	5,265	15,811	5,130
Pb	24,827	7,263	17,718	8,650	28,710	8,968	0,000	0,000	20,025	8,440	19,631	8,464	35,150	7,946	30,715	7,827
Rb	3,461	2,051	7,333	2,439	0,000	0,000	3,643	2,472	9,652	2,439	0,000	0,000	4,725	2,229	0,000	0,000
Sr	6,102	1,901	0,000	0,000	11,748	2,383	4,791	2,221	0,000	0,000	5,206	2,147	6,963	1,887	7,814	2,066
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	57,229	22,597	48,260	20,116
V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	19,237	13,998	37,231	14,358
Zn	9,532	3,351	0,000	0,000	0,000	0,000	13,090	3,912	19,568	3,676	16,614	3,891	9,988	3,383	10,382	3,493
pH =	11,666		11,866		11,764		11,95		11,626		11,799		11,875		11,191	
$\sigma$ (mS/cm) =	887,7		889,7		533,3		885,6		480,3		677,5		826,9		631,6	
$\sigma^*$ (mS.cm <sup>2</sup> ) =	177540,0		177940,0		106660,0		177120,0		96060,0		135500,0		165380,0		126320,0	
m (g) / d (kg/m <sup>3</sup> ) =	419,7	2137,5	420,2		420,4		421		421,1		421,2		421,5		421,8	

Pb 40																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	12,045	2,595	0,000	0,000	0,000	0,000	10,997	2,991	5,843	2,939	5,523	2,747	9,720	2,785	7,052	2,661
Ca	142,253	48,273	130,891	59,703	152,954	59,849	79,003	62,661	164,011	59,316	162,447	61,477	498,442	19,105	1014,008	23,167
Cd	13,511	3,803	11,627	5,010	12,444	5,066	22,682	4,549	11,169	4,962	5,863	4,977	10,557	4,652	9,592	3,920
Co	0,000	0,000	24,812	6,388	10,340	6,634	11,462	6,749	14,104	6,875	18,592	5,696	11,650	6,203	0,000	0,000
Cr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	15,471	12,870	54,451	13,058	18,753	10,950	19,891	12,137	0,000	0,000
Cu	26,376	4,023	42,910	4,277	26,666	4,468	30,500	4,474	36,471	4,570	32,871	4,265	31,730	4,241	39,102	4,173
Fe	29,300	6,986	33,761	7,667	24,466	7,734	46,315	8,023	28,252	7,771	31,000	7,417	22,498	7,356	45,608	7,182
Mn	0,000	0,000	0,000	0,000	18,850	10,301	0,000	0,000	32,375	10,018	0,000	0,000	14,457	9,037	0,000	0,000
Ni	11,711	4,405	9,576	4,576	0,000	0,000	8,708	5,660	8,908	5,592	9,089	5,167	15,344	5,319	0,000	0,000
Pb	0,000	0,000	26,307	8,003	22,506	8,440	30,675	8,716	20,898	8,631	30,828	7,931	25,576	7,926	44,665	7,729
Rb	5,190	1,976	0,000	0,000	11,912	2,414	6,775	2,448	4,662	2,431	3,873	2,035	6,287	2,261	0,000	0,000
Sr	0,000	0,000	0,000	0,000	11,537	2,244	8,925	2,294	7,624	2,239	10,634	2,091	6,481	2,093	5,056	1,998
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	36,384	15,365	0,000	0,000
Zn	14,327	3,446	6,693	3,568	15,961	3,677	0,000	0,000	14,505	3,834	11,229	3,677	8,748	3,710	12,898	3,488
pH =	11,083		11,788		11,658		11,832		11,65		11,821		12,049		11,476	
$\sigma$ (mS/cm) =	665,7		769,4		484,1		747		539,2		728,5		1016,8		860,5	
$\sigma^*$ (mS.cm <sup>2</sup> ) =	133140,0		153880,0		96820,0		149400,0		107840,0		145700,0		203360,0		172100,0	
m (g) / d (kg/m <sup>3</sup> ) =	411,6	2096,3	412,1		412,4		412,7		413		413,1		413,7		414,2	



Pb 80																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	6,054	2,429	3,564	2,960	9,149	2,677	0,000	0,000	0,000	0,000	11,136	3,014	10,881	2,821	0,000	0,000
Ca	168,082	48,948	237,282	16,979	149,691	61,317	211,674	57,168	163,305	63,952	231,899	61,521	468,014	19,109	1227,886	24,430
Cd	12,034	4,762	0,000	0,000	0,000	0,000	33,327	5,574	6,583	5,256	18,966	5,079	0,000	0,000	18,892	4,464
Co	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	10,705	6,677	0,000	0,000	0,000	0,000
Cr	0,000	0,000	26,689	12,589	45,313	12,567	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	22,796	12,600	0,000	0,000
Cu	16,279	3,818	24,067	4,287	24,677	4,194	42,147	4,298	29,960	4,428	31,142	4,439	33,849	4,329	47,167	4,250
Fe	37,049	7,221	49,658	7,819	44,869	7,911	45,156	7,768	41,747	7,393	49,797	8,114	22,614	7,084	43,311	7,148
Mn	0,000	0,000	0,000	0,000	39,645	9,727	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	23,252	9,782	0,000	0,000
Ni	11,924	4,757	13,036	5,051	0,000	0,000	12,732	5,243	3,990	5,061	10,064	5,408	11,996	4,653	0,000	0,000
Pb	31,246	7,600	17,163	5,616	32,698	8,625	0,000	0,000	40,584	8,561	27,546	8,582	18,296	8,138	23,578	7,857
Rb	0,000	0,000	7,468	2,397	5,588	2,311	0,000	0,000	0,000	0,000	12,290	2,443	6,690	2,277	6,736	2,239
Sr	0,000	0,000	11,672	2,247	5,481	2,228	6,604	2,235	6,579	2,157	10,524	2,266	0,000	0,000	6,362	2,075
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	17,399	14,222	31,251	14,263
Zn	0,000	0,000	17,670	3,696	0,000	0,000	20,122	3,882	8,422	3,756	16,249	3,832	9,550	3,742	22,298	3,594
<b>pH =</b>	11,647		11,874		11,71		11,997		11,665		11,869		12,109		11,502	
<b>σ (mS/cm) =</b>	811,3		824,6		586,2		911,3		624,1		775		1193,7		974,6	
<b>σ* (mS.cm²) =</b>	162260,0		164920,0		117240,0		182260,0		124820,0		155000,0		238740,0		194920,0	
<b>m (g) / d (kg/m³) =</b>	423,8	2158,4	424,5		424,9		425,5		425,7		425,7		426,2		426,5	

Pb 160																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	19,452	2,913	11,541	2,904	5,596	2,901	11,576	2,975	0,000	0,000	8,522	2,866	5,425	2,860	8,072	2,477
Ca	125,673	62,125	0,000	0,000	141,584	63,941	139,282	63,241	389,286	18,192	281,796	17,233	671,575	20,339	122,256	57,772
Cd	12,860	4,275	16,490	5,039	11,163	5,618	15,399	4,439	9,637	5,169	25,975	5,103	17,983	4,994	11,424	4,794
Co	11,745	6,408	0,000	0,000	16,553	5,851	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	17,861	5,554
Cr	0,000	0,000	26,926	13,002	23,050	13,295	19,434	11,502	28,266	13,489	0,000	0,000	43,036	12,673	40,809	10,653
Cu	37,191	4,270	34,230	4,227	31,794	4,416	34,232	4,490	31,721	4,554	37,297	4,336	26,893	4,360	29,418	3,932
Fe	24,244	7,398	25,732	7,936	37,750	7,946	45,895	8,121	10,932	8,048	28,879	7,612	41,853	7,780	25,189	7,502
Mn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	23,932	10,132	0,000	0,000	0,000	0,000	24,391	9,868	0,000	0,000
Ni	12,846	5,176	0,000	0,000	11,666	5,504	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,290	5,163
Pb	21,549	8,139	28,804	8,492	40,209	8,493	29,912	8,573	0,000	0,000	38,503	8,226	52,406	8,258	29,337	7,817
Rb	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	10,305	2,449	0,000	0,000	4,541	2,278	6,406	2,332	7,931	2,245
Sr	5,348	2,134	5,288	2,229	0,000	0,000	4,594	2,282	5,395	2,199	11,781	2,158	9,456	2,145	6,843	2,050
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	33,925	20,386	0,000	0,000
V	0,000	0,000	47,410	15,454	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	28,479	15,960	0,000	0,000
Zn	8,496	3,695	21,473	3,671	0,000	0,000	21,135	3,905	14,366	3,974	7,626	3,621	17,519	3,787	11,201	3,578
pH =	11,496		11,824		11,659		11,997		11,717		11,894		12,008		11,394	
$\sigma$ (mS/cm) =	757,7		807		498,7		909,4		562,2		790,9		984,1		809,6	
$\sigma^*$ (mS.cm <sup>2</sup> ) =	151540,0		161400,0		99740,0		181880,0		112440,0		158180,0		196820,0		161920,0	
m (g) / d (kg/m <sup>3</sup> ) =	418,9	2133,4	419,6		420		420,4		420,5		420,6		421		421,2	

<b>Zn 20</b>																
<b>Elementos</b>	<b>1ª Extração</b>		<b>2ª Extração</b>		<b>3ª Extração</b>		<b>4ª Extração</b>		<b>5ª Extração</b>		<b>6ª Extração</b>		<b>7ª Extração</b>		<b>8ª Extração</b>	
	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>
As	7,307	2,783	5,048	2,950	7,445	2,844	0,000	0,000	7,174	2,834	7,959	2,820	6,414	2,776	0,000	0,000
Ca	105,167	54,470	111,025	61,803	75,454	49,585	238,258	61,731	81,274	58,277	197,426	62,927	600,556	20,086	342,466	17,542
Cd	0,000	0,000	13,491	5,420	13,328	4,732	20,031	4,308	5,896	5,178	5,768	5,097	21,341	4,813	20,071	4,766
Co	0,000	0,000	20,306	5,981	0,000	0,000	18,196	5,726	0,000	0,000	0,000	0,000	15,200	6,241	10,881	5,792
Cr	0,000	0,000	0,000	0,000	24,627	12,243	50,810	12,927	0,000	0,000	0,000	0,000	22,583	10,789	26,221	12,375
Cu	23,719	4,278	33,115	4,437	29,306	4,344	24,194	4,277	42,181	4,360	20,042	4,295	23,749	4,222	29,176	4,371
Fe	18,319	7,434	33,665	7,608	0,000	0,000	17,226	7,652	31,573	7,637	27,612	7,256	27,085	7,311	37,585	7,682
Mn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	24,756	9,668	27,952	9,665
Ni	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	14,883	4,857	16,363	4,637	19,528	5,341	0,000	0,000
Pb	26,338	7,942	20,469	8,373	17,044	8,148	26,577	8,081	17,790	8,146	25,653	8,042	10,896	7,839	26,726	8,201
Rb	0,000	0,000	6,585	2,406	6,614	2,320	5,293	2,337	2,754	2,327	0,000	0,000	6,893	2,258	0,000	0,000
Sr	0,000	0,000	5,647	2,214	5,415	2,166	6,158	2,151	5,372	2,139	7,019	2,121	9,165	2,085	8,621	2,156
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	48,144	20,668	0,000	0,000
V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	30,535	14,322	34,969	14,865
Zn	13,830	3,702	15,845	3,822	16,455	3,713	8,515	3,713	18,744	3,665	16,466	3,712	13,989	3,548	20,008	3,751
<b>pH =</b>	11,535		11,71		11,666		11,875		11,728		11,892		11,92		10,941	
<b>σ (mS/cm) =</b>	707,7		713,3		539,2		801,3		584,9		750,9		881,9		567,5	
<b>σ* (mS.cm²) =</b>	141540,0		142660,0		107840,0		160260,0		116980,0		150180,0		176380,0		113500,0	
<b>m (g) / d (kg/m³) =</b>	416,9	2123,3	417,4		417,8		418,1		418,5		418,7		418,9		419,5	

<b>Zn 40</b>																
<b>Elementos</b>	<b>1ª Extração</b>		<b>2ª Extração</b>		<b>3ª Extração</b>		<b>4ª Extração</b>		<b>5ª Extração</b>		<b>6ª Extração</b>		<b>7ª Extração</b>		<b>8ª Extração</b>	
	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>
As	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	10,222	2,968	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,447	2,973
Ca	117,753	58,705	220,534	17,166	209,474	63,420	392,053	19,478	0,000	0,000	248,218	17,243	472,707	18,943	197,356	57,701
Cd	16,914	4,089	0,000	0,000	21,614	5,047	12,764	5,332	0,000	0,000	14,139	4,847	16,804	4,868	0,000	0,000
Co	15,797	5,657	15,446	6,135	0,000	0,000	17,647	5,750	0,000	0,000	0,000	0,000	11,035	5,625	0,000	0,000
Cr	30,406	12,574	24,971	12,385	22,140	12,647	34,171	12,849	0,000	0,000	0,000	0,000	40,424	12,765	0,000	0,000
Cu	33,558	4,204	34,158	4,532	27,685	4,191	34,078	4,413	36,715	4,466	31,844	3,901	34,333	4,274	35,672	4,510
Fe	9,430	7,313	35,866	8,030	19,473	7,800	40,174	8,068	25,554	7,758	30,737	7,669	36,695	7,875	17,111	7,683
Mn	16,614	9,561	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	30,233	8,604	0,000	0,000
Ni	11,635	5,041	0,000	0,000	6,179	5,110	14,854	5,366	0,000	0,000	0,000	0,000	8,957	4,694	0,000	0,000
Pb	32,248	7,952	20,215	8,454	24,963	8,440	0,000	0,000	29,178	8,530	40,297	8,283	11,477	8,101	28,601	8,464
Rb	6,082	2,256	7,604	2,426	10,731	2,448	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,896	2,311	7,858	2,426
Sr	0,000	0,000	6,634	2,231	7,407	2,251	0,000	0,000	0,000	0,000	4,961	2,084	0,000	0,000	9,156	2,234
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	39,495	14,510	0,000	0,000
Zn	0,000	0,000	9,243	3,848	16,611	3,633	19,632	3,859	18,080	3,800	4,953	3,633	11,943	3,627	19,068	3,874
<b>pH =</b>	11,7		11,903		11,691		11,995		11,882		11,976		12,078		11,471	
<b>σ (mS/cm) =</b>	853,7		940,7		588,4		1019,8		722,1		787,7		1266,3		925	
<b>σ* (mS.cm<sup>2</sup>) =</b>	170740,0		188140,0		117680,0		203960,0		144420,0		157540,0		253260,0		185000,0	
<b>n (g) / d (kg/m<sup>3</sup>) =</b>	423,4		2156,4		423,9		424,1		424,5		424,7		425,1		425,4	

Apêndices

Zn 80																
Elementos	1ª Extração		2ª Extração		3ª Extração		4ª Extração		5ª Extração		6ª Extração		7ª Extração		8ª Extração	
	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP	C (ppm)	DP
As	8,784	2,693	0,000	0,000	8,011	2,831	3,267	2,814	12,077	2,836	5,143	2,887	0,000	0,000	8,252	2,789
Ca	531,057	19,325	536,155	18,933	84,431	58,530	143,460	64,542	172,602	52,077	303,907	17,515	469,216	19,392	108,893	49,830
Cd	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,777	4,985	11,012	4,321	10,953	4,916	0,000	0,000	10,788	4,739
Co	21,977	5,794	21,342	5,781	8,150	5,628	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	15,978	6,441
Cr	13,717	11,919	0,000	0,000	0,000	0,000	27,924	12,697	0,000	0,000	14,807	12,514	0,000	0,000	57,820	12,921
Cu	24,636	3,858	40,344	3,925	24,478	4,276	10,794	4,257	41,369	4,355	37,587	4,264	32,466	4,139	38,952	4,230
Fe	44,119	7,027	43,515	6,883	29,779	7,554	31,268	7,426	23,497	7,444	35,825	7,360	43,414	7,438	28,105	7,373
Mn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,816	9,489	14,517	9,576	0,000	0,000	0,000	0,000	22,785	9,541
Ni	0,000	0,000	20,029	4,774	15,164	4,744	0,000	0,000	10,631	5,113	18,536	4,912	13,872	5,082	9,679	4,564
Pb	14,962	7,544	0,000	0,000	27,818	8,240	28,536	8,139	28,346	8,095	34,451	8,107	32,153	7,790	30,580	8,154
Rb	0,000	0,000	5,258	2,018	7,001	2,334	0,000	0,000	5,418	2,299	5,408	2,298	7,797	2,251	5,101	2,259
Sr	6,519	1,993	5,811	1,855	0,000	0,000	0,000	0,000	6,613	2,114	11,268	2,183	4,684	2,012	7,096	2,117
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	0,000	0,000	20,814	12,869	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn	15,183	3,418	20,668	3,382	16,619	3,713	15,870	3,701	15,305	3,609	25,207	3,754	11,975	3,496	27,107	3,712
pH =	11,757		11,876		11,698		11,997		11,857		11,885		11,984		11,324	
$\sigma$ (mS/cm) =	857,9		945,8		645		893,8		682,2		788,1		998,7		858,1	
$\sigma^*$ (mS.cm <sup>2</sup> ) =	171580,0		189160,0		129000,0		178760,0		136440,0		157620,0		199740,0		171620,0	
m (g) / d (kg/m <sup>3</sup> ) =	422,6	2152,3	423,2		423,4		423,8		424		424		424,4		424,7	

<b>Zn 160</b>																
<b>Elementos</b>	<b>1ª Extração</b>		<b>2ª Extração</b>		<b>3ª Extração</b>		<b>4ª Extração</b>		<b>5ª Extração</b>		<b>6ª Extração</b>		<b>7ª Extração</b>		<b>8ª Extração</b>	
	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>	<b>C (ppm)</b>	<b>DP</b>
As	4,065	2,992	0,000	0,000	9,971	2,968	3,927	2,972	6,875	2,963	9,501	2,968	5,073	2,812	9,354	2,888
Ca	409,151	18,596	435,129	18,477	120,450	53,322	441,614	18,972	0,000	0,000	267,257	17,483	616,506	20,981	217,983	53,102
Cd	27,209	4,603	10,112	4,584	0,000	0,000	0,000	0,000	32,621	5,568	9,369	4,827	27,235	5,087	23,550	4,781
Co	10,279	6,660	10,425	5,789	15,391	6,823	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	13,240	5,805
Cr	32,992	12,824	0,000	0,000	0,000	0,000	28,031	13,374	34,548	11,468	41,575	12,585	64,579	12,972	25,021	11,014
Cu	30,143	4,510	25,367	4,178	26,970	4,498	29,875	4,510	28,365	4,281	40,600	4,530	34,283	4,327	28,699	4,349
Fe	28,991	7,989	13,860	7,209	32,456	8,069	38,592	7,966	8,025	7,828	17,351	7,829	31,439	7,593	40,119	7,746
Mn	20,102	10,100	0,000	0,000	0,000	0,000	25,553	9,489	26,779	10,556	0,000	0,000	0,000	0,000	32,639	8,534
Ni	0,000	0,000	0,000	0,000	8,445	5,452	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,161	5,267	15,305	5,303
Pb	18,898	8,611	17,667	7,812	0,000	0,000	29,098	6,770	19,221	5,331	32,722	8,564	25,724	8,111	12,278	4,682
Rb	3,995	2,186	0,000	0,000	8,099	2,443	6,199	2,398	9,018	2,432	7,827	2,436	0,000	0,000	9,211	2,312
Sr	5,341	2,289	0,000	0,000	7,698	2,256	3,484	2,221	6,252	2,231	3,656	2,246	0,000	0,000	8,074	2,159
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn	19,933	3,909	12,760	3,620	17,114	3,892	10,389	3,854	7,492	3,858	20,868	3,936	13,343	3,739	17,926	3,799
<b>pH =</b>	11,763		11,841		11,742		11,98		11,71		11,904		11,834		11,237	
<b>σ (mS/cm) =</b>	889,7		886,7		514,1		900,3		706,9		757,3		849,5		744,3	
<b>σ* (mS.cm²) =</b>	177940,0		177340,0		102820,0		180060,0		141380,0		151460,0		169900,0		148860,0	
<b>m (g) / d (kg/m³) =</b>	419,4	2136,0	420,1		420,3		420,7		420,9		420,9		421,1		421,7	

## APÊNDICE 4 – Mecanismos de lixiviação

As siglas contidas nas tabelas significam respectivamente: DIF = Difusão; MNCD = Mecanismo não controlado por difusão; LS = Lavagem superficial; ESG = Esgotamento; DISS = Dissolução. Nos quadros onde não houve classificação, significa que o elemento não foi liberado naquele período ou foi liberado somente em uma das extrações verificadas.

REF 0,40																		
Incrementos																		
Elementos	2,7			5,8			4,7			3,6			2,5			1,5		
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF
As	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Ca	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Cd	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD
Co	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD
Cr	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Cu	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Fe	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Mn	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	MNCD	LS	MNCD	MNCD
Ni	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Pb	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	LS	MNCD
Rb	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	-	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD
Sr	LS	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF

REF 0,50																		
Incrementos																		
Elementos	2,7			5,8			4,7			3,6			2,5			1,5		
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF
As	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Ca	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Cd	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD
Co	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	-	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD
Cr	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Cu	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Fe	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Mn	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Ni	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD
Pb	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	LS	MNCD	DIF
Rb	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Sr	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	-	-	DIF
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	LS	MNCD	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD
Zn	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD

Apêndices

REF 0,60																				
Incrementos																				
Elementos	2,7			5,8			4,7			3,6			2,5			1,5				
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF		
As	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	-	MNCD	MNCD	-	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD		
Ca	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD		
Cd	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	LS	MNCD	DIF		
Co	-	-	MNCD	-	MNCD	-	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD		
Cr	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF		
Cu	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD		
Fe	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF		
Mn	-	-	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD		
Ni	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF		
Pb	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF		
Rb	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD		
Sr	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD		
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Zn	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	-	-	DIF		

Cd 20																				
Incrementos																				
Elementos	2,7			5,8			4,7			3,6			2,5			1,5				
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF		
As	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	MNCD	DIF		
Ca	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	LS	MNCD	DIF		
Cd	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF		
Co	-	-	MNCD	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	MNCD	LS	MNCD	DIF		
Cr	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	-	MNCD	MNCD	-	-	-	-	-	MNCD		
Cu	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD		
Fe	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD		
Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Ni	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF		
Pb	LS	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	-	MNCD	MNCD	LS	MNCD	DIF		
Rb	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD		
Sr	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD		
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Zn	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	LS	MNCD	DIF		

Cd 40																				
Incrementos																				
Elementos	2,7			5,8			4,7			3,6			2,5			1,5				
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF		
As	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD		
Ca	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	LS	MNCD	DIF		
Cd	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF		
Co	-	-	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD		
Cr	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF		
Cu	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD		
Fe	LS	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD		
Ma	LS	DIF	-	DIF	MNCD	-	ESG	-	-	ESG	-	-	ESG	-	-	LS	-	MNCD		
Ni	-	-	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	-	-	MNCD	-	-	DIF	-	-	DIF		
Pb	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD		
Rb	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	-	ESG	-	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD		
Sr	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	MNCD	DIF		
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Zn	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF		



Apêndices

Cd 80																			
Incrementos																			
Elementos	2_7			5_8			4_7			3_6			2_5			1_5			
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	
As	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	
Ca	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	DISS	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF
Cd	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	
Co	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	-	-	-	-	-	DIF	MNCD
Cr	-	-	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	DIF	-	-	DIF	-	-	DIF	-	-	-	DIF
Cu	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	MNCD
Fe	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	MNCD
Mn	0,00	DIF	-	DIF	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	DIF	MNCD
Ni	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	MNCD
Pb	-	-	MNCD	ESG	MNCD	-	0	-	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	MNCD
Rb	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	-	-	-	DIF
Sr	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	LS	MNCD	DIF	MNCD
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	MNCD

Cd 160																			
Incrementos																			
Elementos	2_7			5_8			4_7			3_6			2_5			1_5			
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	
As	LS	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD
Ca	LS	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	LS	LS	MNCD	DIF
Cd	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	MNCD
Co	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	-	-	-	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	LS	MNCD	MNCD
Cr	LS	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD	MNCD
Cu	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	MNCD
Fe	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	LS	LS	MNCD	DIF
Mn	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	DIF	MNCD	MNCD
Ni	LS	MNCD	DIF	-	-	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	LS	LS	MNCD	DIF
Pb	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	MNCD
Rb	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	LS	LS	MNCD	DIF
Sr	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	MNCD
Ti	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	MNCD
V	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	MNCD
Zn	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	DIF	MNCD	MNCD

Cr 20																		
Incrementos																		
Elementos	2_7			5_8			4_7			3_6			2_5			1_5		
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF
As	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Ca	DIF	MNCD	DIF	DISS	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Cd	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Co	-	-	DIF	-	-	DIF	-	-	DIF	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-
Cr	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Cu	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Fe	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Mn	-	DIF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	MNCD
Ni	-	-	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD
Pb	DISS	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Rb	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF	-	-	DIF
Sr	-	-	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD

Apêndices

Cr 40																		
Incrementos																		
Elementos	2_7			5_8			4_7			3_6			2_5			1_5		
	re	sd	CF	re	sd	CF	re	sd	CF	re	sd	CF	re	sd	CF	re	sd	CF
As	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Ca	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Cd	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Co	DIF	MNCD	-	ESG	MNCD	-	ESG	MNCD	-	ESG	MNCD	-	DISS	MNCD	-	-	-	-
Cr	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Cu	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Fe	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Mn	LS	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	DIF	MNCD
Ni	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	LS	DIF	MNCD
Pb	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD
Rb	-	-	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-
Sr	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Ti	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD

Cr 80																		
Incrementos																		
Elementos	2_7			5_8			4_7			3_6			2_5			1_5		
	re	sd	CF	re	sd	CF	re	sd	CF	re	sd	CF	re	sd	CF	re	sd	CF
As	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Ca	LS	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	MNCD	DIF
Cd	LS	MNCD	-	ESG	MNCD	-	ESG	MNCD	-	ESG	MNCD	-	DIF	MNCD	-	DIF	MNCD	-
Co	-	-	DIF	DISS	MNCD	DIF	-	-	DIF	-	-	-	-	MNCD	-	-	-	MNCD
Cr	-	-	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	-	-	DIF	-	-	DIF
Cu	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF
Fe	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Mn	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	LS	DIF	MNCD
Ni	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD
Pb	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Rb	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	-	-	DIF
Sr	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	DIF	MNCD
Zn	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF

Cr 160																		
Incrementos																		
Elementos	2_7			5_8			4_7			3_6			2_5			1_5		
	re	sd	CF	re	sd	CF	re	sd	CF	re	sd	CF	re	sd	CF	re	sd	CF
As	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	DIF	-	-	DIF
Ca	DIF	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Cd	-	-	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD
Co	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD
Cu	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Fe	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Mn	LS	DIF	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	MNCD
Ni	-	-	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD
Pb	-	-	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	-	-	MNCD	-	-	MNCD
Rb	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Sr	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Ti	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF

Apêndices

Pb 20																		
Incrementos																		
Elementos	2_7			5_8			4_7			3_6			2_5			1_5		
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF
As	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Ca	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Cd	DIF	MNCD	-	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	-	DISS	MNCD	-
Co	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Cr	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Cu	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Fe	DIF	MNCD	-	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF
Mn	-	-	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD
Ni	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	-	-	DIF
Pb	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Rb	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Sr	DIF	MNCD	-	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	-	DIF	MNCD	-
Ti	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	DIF	MNCD	-	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	-	DIF	MNCD	-

Pb 40																		
Incrementos																		
Elementos	2_7			5_8			4_7			3_6			2_5			1_5		
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF
As	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	LS	MNCD	DIF
Ca	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Cd	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Co	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD
Cr	-	-	DIF	ESG	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF	-	-	DIF	-	-	DIF	-	-	DIF
Cu	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Fe	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Mn	-	-	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD
Ni	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD
Pb	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	-
Rb	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF	DIF	MNCD
Sr	-	-	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF

Pb 80																		
Incrementos																		
Elementos	2_7			5_8			4_7			3_6			2_5			1_5		
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF
As	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Ca	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Cd	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Co	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	-
Cr	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	-	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD
Cu	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Fe	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Mn	-	-	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	0	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD
Ni	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	LS	MNCD	DIF
Pb	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Rb	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	-	-	MNCD
Sr	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	-	-	DIF

Apêndices

Pb 160																		
Incrementos																		
Elementos	2_7			5_8			4_7			3_6			2_5			1_5		
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF
As	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF	LS	MNCD	DIF
Ca	DISS	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Cd	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD
Co	LS	DIF	MNCD	ESG	MNCD	-	-	-	-	-	-	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Cr	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD
Cu	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Fe	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Mn	-	-	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD
Ni	LS	DIF	MNCD	ESG	MNCD	-	-	-	-	-	-	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD
Pb	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Rb	-	-	DIF	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	-	-	DIF	-	-	MNCD	-	-	MNCD
Sr	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Ti	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	LS	DIF	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	0	-	-	0	-	-	MNCD	-	MNCD
Zn	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF

Zn 20																		
Incrementos																		
Elementos	2_7			5_8			4_7			3_6			2_5			1_5		
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF
As	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Ca	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Cd	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	-	-	DIF
Co	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	-	-	MNCD
Cr	-	-	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	-	-	DIF	-	-	DIF
Cu	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Fe	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD
Mn	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	-	-	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD
Pb	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Rb	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	-	-	DIF
Sr	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	MNCD
Ti	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF

Zn 40																		
Incrementos																		
Elementos	2_7			5_8			4_7			3_6			2_5			1_5		
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF
As	-	-	MNCD	ESG	MNCD	-	0	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD
Ca	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Cd	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Co	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD
Cr	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Cu	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Fe	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF
Mn	LS	DIF	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	DIF
Ni	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	LS	MNCD	DIF
Pb	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD
Rb	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	0	-	-	MNCD	ESG	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Sr	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	-	-	MNCD
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF	-	-	DIF

Apêndices

Zn 80																		
Incrementos																		
Elementos	2,7			5,8			4,7			3,6			2,5			1,5		
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF
As	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Ca	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	LS	MNCD	DIF
Cd	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD
Co	LS	DIF	DIF	ESG	MNCD	-	-	-	-	-	MNCD	ESG	MNCD	DIF	LS	MNCD	DIF	
Cr	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Cu	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Fe	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Mn	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD
Ni	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Pb	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Rb	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Sr	LS	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	MNCD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	MNCD	-	-	MNCD
Zn	LS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD

Zn 160																		
Incrementos																		
Elementos	2,7			5,8			4,7			3,6			2,5			1,5		
	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF	rc	sd	CF
As	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DISS	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Ca	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Cd	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	LS	MNCD	DIF
Co	LS	DIF	MNCD	ESG	MNCD	-	-	-	-	-	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	
Cr	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DISS	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	LS	MNCD	MNCD
Cu	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Fe	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Mn	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Ni	LS	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	-	MNCD	0	-	MNCD	0	-	MNCD
Pb	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD
Rb	DIF	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	MNCD	DISS	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF
Sr	DIF	MNCD	DIF	ESG	MNCD	MNCD	ESG	MNCD	MNCD	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	LS	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	ESG	MNCD	DIF	DIF	MNCD	DIF

**APÊNDICE 5 – pH durante o ensaio de tanque**

