



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CONSTRUÇÃO CIVIL
LINHA DE PESQUISA: MATERIAIS E PROCESSOS
CONSTRUTIVOS**

LIDIANE FERNANDA JOCHEM

**EFEITO DO AGREGADO RECICLADO DOS RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NA RETENÇÃO DOS METAIS
PESADOS EM PROCESSOS DE SOLIDIFICAÇÃO E
ESTABILIZAÇÃO**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau de DOU-
TOR em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a Dr^a Janaíde Cavalcante Rocha.

**FLORIANÓPOLIS
2017**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Jochem, Lidiane Fernanda

Efeito do agregado reciclado dos resíduos de construção e demolição na retenção dos metais pesados em processos de solidificação e estabilização /

Lidiane Fernanda Jochem ; orientadora, Janaide Cavalcante Rocha, 2017.

299 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Cura interna. 3. Agregado reciclado. 4. Processo de Solidificação/ Estabilização. 5. Metal pesado. I. Rocha, Janaide Cavalcante. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Lidiane Fernanda Jochem

**EFEITO DO AGREGADO RECICLADO DOS RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NA RETENÇÃO DOS METAIS
PESADOS EM PROCESSOS DE SOLIDIFICAÇÃO E
ESTABILIZAÇÃO**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “DOUTOR”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 16 de Outubro de 2017.

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof.^a Janaíde Cavalcante Rocha, Dr.^a
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Valdir Schalch, Dr.
Escola de Engenharia de São Carlos
- Universidade de São Paulo
(Videoconferência)

Prof. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro,
Dr.
Universidade Federal de Pernambuco
(Videoconferência)

Prof. Adriano da Silva, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Armando Borges de Castilhos Junior, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Philippe Jean Paul Gleize, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

À professora Janaíde Cavalcante Rocha por ter aceitado ser minha orientadora e por me ajudar na realização desta pesquisa.

À professora Marilda Barra Bizinotto por ter aceitado me orientar no período Sandwich, por ter me recebido com tanto carinho e sempre estar disposta a me ajudar. Sua dedicação com o trabalho é inspirador.

A Capes e a CNPq pelo imprescindível apoio financeiro e suporte para realização da campanha experimental.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e a Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) por proporcionar a estrutura para realizar o doutorado.

Às empresas que contribuíram com a doação dos materiais utilizados: Cromados Barba e Garcia, pelo resíduo de galvanoplastia; Cinexpan Indústria e Comércio de Argila Expandida Ltda, pelo agregado leve; a usina de beneficiamento SC Recibras, pelo agregado reciclado.

Ao LCME-UFSC pelo suporte técnico durante o trabalho de microscopia eletrônica.

Aos colegas do laboratório ValoRes pela amizade, pela ajuda e pelas conversas descontraídas.

Aos meus amigos pela amizade e compreensão, cada um me ajudou de uma forma ou outra para a realização desta pesquisa. Saber que posso contar com vocês foi essencial nesse período.

Aos meus pais Vilmar e Noeli, minhas irmãs Aline e Taisline e as minhas sobrinhas Isadora e Amanda, peço desculpa por sempre estar ausente e agradeço por me entenderem, me apoiarem e por me incentivarem. Amo muito vocês!

Ao meu noivo César por sempre me apoiar e incentivar, sua presença e ajuda foram essenciais. Você é o meu porto seguro, te amo!

Agradezco a los técnicos Sergi y Patricia del laboratorio de Materiales de la UPC, que me ayudaron en los ensayos experimentales. Agradezco a los amigos y colegas del máster/doctorado que conocí en Barcelona: Renan, Andressa, Ricardo, Thalita, Jaime, Mylene, Razmik; que nos acogieron increíblemente bien. Agradezco, en especial, al grupo de investigación, que participé: Susanna Valls del Barrio, Diego Aponte y Karmele Otegui; agradeciendo sobre todo por la paciencia al intentar comprender mí, muy malo, castellano.

Agradeço a todos que me ajudaram de um modo ou de outro para a conclusão desse trabalho.

MUITO OBRIGADA!

“A adversidade desperta em nós capacidades que,
em circunstâncias favoráveis,
teriam ficado adormecidas”
(Horácio)

RESUMO

O crescente interesse no desenvolvimento sustentável, com o número de instalações de britagem dos resíduos de construção civil no país, produzindo agregados reciclados, faz a utilização desses agregados uma prioridade. Um modo de aumentar o consumo desse material é como agente de cura interna (CI), que tem como objetivo fornecer água adicional para a hidratação do cimento, sendo essa água fornecida por reservatórios internos (agregados porosos e absorventes). Assim, esse trabalho buscou verificar o potencial de ação como agente de cura interna e sorvente químico do agregado reciclado, para isso foram produzidas argamassas com substituição parcial (25 %) do agregado natural por agregado leve (ALV) ou agregado reciclado (RCC). As argamassas foram preparadas com os agregados (ALV e RCC) nas condições secas e saturadas previamente por 24 horas e o consumo de água dos agregados descontado da relação água/cimento inicial. Como também, em um primeiro momento foram preparadas, argamassas com cromo (Cr^{6+}), chumbo (Pb^{4+}) e zinco (Zn^{2+}), para verificar o potencial de sorvente químico do agregado e de retenção das argamassas fabricadas com a realização da CI. Em um segundo momento foram preparadas argamassas com resíduo de galvanoplastia no estado líquido. Avaliou-se, em seguida, o desempenho mecânico e caracterizou-se a microestrutura em diferentes tempos de hidratação do cimento (de 1 a 90 dias). Foram utilizadas técnicas de RMN, DRX, MEV e avaliadas a liberação dos metais pelo ensaio de lixiviação e solubilização. O potencial de liberação de água dos agregados em elevadas umidades relativas foi verificado com o auxílio do ensaio de isotermas de dessorção nas frações (0,6 a 2,4 mm) do RCC e ALV e constatado que os agregados podem ser utilizados como agentes de CI. Assim como, concluiu-se que o RCC pode ser utilizado como sorvente químico, absorvendo/ adsorvendo, praticamente, 100 % do chumbo e do zinco e 15 % do cromo devido ao seu pH elevado. Os agregados apresentam diferenças no período de liberação da água dos poros, dependendo do seu estado inicial (seco ou saturado). Quando o agregado foi utilizado saturado auxiliou nas idades iniciais e quando foi utilizado seco previamente, auxiliou na melhora das propriedades físicas e mecânicas no período tardio. Por fim, constatou-se que o RCC pode ser utilizado como agente de CI e como um sorvente químico eficaz, aumentando o seu potencial de utilização além de não trazer prejuízos para o produto final.

Palavras-chave: Cura interna; Agregado reciclado; Processo de Solidificação/ Estabilização; Metal pesado; Sorção química.

ABSTRACT

The growing interest in sustainable development, with the number of crushing facilities for construction and demolition waste in the country, producing recycled aggregates, makes the use of recycled aggregates from construction waste a priority. One way to increase the consumption of this material is as an internal curing agent, which aims to provide additional water for the hydration of the cement, being this water provided by internal reservoirs (porous and absorbent aggregates) which are, usually, previously saturated to preparation of the cementitious material. Thus, this work sought to verify the potential of recycled aggregate as internal curing agent and chemical sorbent. For this, mortars were produced with partial replacement (25%) of the natural aggregate by lightweight aggregate (ALV) or recycled aggregate (RCC). The mortars were prepared with the aggregates (ALV and RCC) dried and previously saturated for 24 hours and the water consumption of the aggregates discounted from the initial a/c ratio. Mortars with chromium (Cr^{6+}), lead (Pb^{4+}) and zinc (Zn^{2+}) were also prepared to verify the chemical sorbent potential of the aggregate and the retention of mortars made with internal curing. The mechanical performance was evaluated and the microstructure was characterized in different times of cement hydration (1, 3, 7, 28 and 90 days). NMR, XRD, SEM and the release of the metals by the leaching test. The water release potential of the aggregates at high relative humidity was verified using the desorption isotherms test in the fractions (0.6 to 2.4 mm) of the lightweight and recycled aggregate and was found that the aggregates can be used as agents of internal curing. As well, was concluded that RCC could be used as a chemical sorbent, absorbent/adsorbent, practically 100 % of lead and zinc and 15 % of chromium due to its high pH. It was noticed that the aggregates present differences in the period of water release from the pores, depending on the initial state (dry or saturated) of the aggregate. When used saturated, the aggregate helped in the initial ages and when the aggregate was used dry previously helped in the improvement of properties in the late period. Finally, it was noticed that the recycled aggregate can be used as an internal curing agent and as an effective chemical sorbent, increasing its potential for use and not to damage the final product.

Keywords: Internal curing; Recycled Aggregate; Solidification/ Stabilization; Heavy metal; Chemical sorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Metodologia de teste ideal do produto de solidificação.....	50
Figura 2: Diferentes ambientes químicos dos picos de silício.....	57
Figura 3: Proporções do agregado. O volume total de agregado leve é composto por sólidos, poros cheios de água (água de cura interna) e poros vazios.....	66
Figura 4: Cura interna na zona de contato: diferenças entre o agregado leve e o agregado de peso normal no estado fresco e endurecido do concreto.....	74
Figura 5: Esquema da nova e velha ZTI do agregado reciclado no material cimentício.....	75
Figura 6: Fluxograma dos ensaios de caracterização dos materiais.....	82
Figura 7: Fluxograma dos ensaios de caracterização das argamassas...	83
Figura 8: Fluxograma das etapas metodológica 05 e 06.....	83
Figura 9: Aparato experimental do ensaio de calor de hidratação.....	97
Figura 10: Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	99
Figura 11: (a) Porta amostra; (b) Câmara pronta para o ensaio.....	101
Figura 12: Isotermas de adsorção dos agregados reciclados e leves...	109
Figura 13: Isotermas de dessorção dos agregados reciclados e leves..	110
Figura 14: Absorção de água dos grãos em função do tempo: RCC(a) e ALV(b).....	114
Figura 15: Estoque de água infiltrada nos grãos pela raiz do tempo...	115
Figura 16: Imagens dos grãos do agregado reciclado.....	116
Figura 17: Difratoograma do agregado reciclado.....	117
Figura 18: Imagens dos grãos do agregado leve.....	118
Figura 19: Difratoograma do agregado leve.....	118
Figura 20: Eficiência da sorção dos agregados.....	122
Figura 21: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de referências.....	130
Figura 22: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de agregado reciclado com chumbo.....	131
Figura 23: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de agregado reciclado com cromo.....	132
Figura 24: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de agregado reciclado com zinco.....	133
Figura 25: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de agregado leve com chumbo.....	133
Figura 26: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de agregado leve com cromo.....	134

Figura 27: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de agregado leve com zinco.....	135
Figura 28: Resistência à compressão das amostras referências ao longo do tempo.	143
Figura 29: Resistência à compressão das amostras de agregado reciclado com chumbo ao longo do tempo.	144
Figura 30: Resistência à compressão das amostras de agregado reciclado com cromo ao longo do tempo.....	145
Figura 31: Resistência à compressão das amostras de agregado reciclado com zinco ao longo do tempo.	146
Figura 32: Resistência à compressão das amostras de agregado leve com chumbo ao longo do tempo.	147
Figura 33: Resistência à compressão das amostras de agregado leve com cromo ao longo do tempo.....	147
Figura 34: Resistência à compressão das amostras de agregado leve com zinco ao longo do tempo.	148
Figura 35: Resistência à tração na flexão das amostras de referências ao longo do tempo.	152
Figura 36: Resistência à tração na flexão das amostras de agregado reciclado com chumbo ao longo do tempo.	153
Figura 37: Resistência à tração na flexão das amostras de agregado reciclado com cromo ao longo do tempo.	153
Figura 38: Resistência à tração na flexão das amostras de agregado reciclado com zinco ao longo do tempo.....	154
Figura 39: Resistência à tração na flexão das amostras de agregado leve com chumbo ao longo do tempo.	155
Figura 40: Resistência à tração na flexão das amostras de agregado leve com cromo ao longo do tempo.....	155
Figura 41: Resistência à tração na flexão das amostras de agregado leve com zinco ao longo do tempo.	156
Figura 42: Variação dimensional das argamassas ao longo do tempo.	159
Figura 43: Absorção de água pelo tempo das argamassas de referência.	162
Figura 44: Absorção de água pelo tempo das argamassas.	163
Figura 45: Volume de água absorvido pelas amostras de referências por capilaridade em função do tempo.	165
Figura 46: Volume de água absorvido pelas amostras com agregado reciclado por capilaridade em função do tempo.....	166
Figura 47: Volume de água absorvido pelas amostras com agregado leve por capilaridade em função do tempo.	168

Figura 48: Permeabilidade ao vapor das argamassas em diferentes idades de hidratação.	173
Figura 49: Distância percorrida pela água a partir do agregado poroso em diferentes idades.	176
Figura 50: Distribuição de fases da pasta de cimento com 1 dia de hidratação.	180
Figura 51: Distribuição de fases da pasta de cimento com 28 dias de hidratação.	180
Figura 52: Liberação acumulada dos metais de interesse pelo tempo.	186
Figura 53: pH da amostra em função do teor de ácido adicionado.	197
Figura 54: Condutividade elétrica das amostras em função do teor de ácido.	198
Figura 55: Liberação do cálcio em função do pH.	199
Figura 56: Concentração lixiviada do cromo em função do pH.	200
Figura 57: Concentração lixiviada em função do pH.	201
Figura 58: Imagens de MEV das amostras com RCC com 3 e 28 dias (CONTINUA).	204
Figura 59: Imagens de MEV das argamassas com ALV com 3 e 28 dias (CONTINUA).	206
Figura 60: Espectros de ²⁹ Si CP-MASS/RMN do cimento anidro.	208
Figura 61: Espectros de ²⁹ Si CP-MASS/RMN das argamassas.	209
Figura 62: Resistência à compressão e grau de hidratação das argamassas com 3 e 28 dias com incorporação de 300 ppm de cromo.	213
Figura 63: Difratoograma das amostras de referência com 28 dias de hidratação.	216
Figura 64: Difratoograma das amostras com 3 dias de hidratação e 300 ppm de cromo.	217
Figura 65: Difratoograma das amostras com 28 dias de hidratação e 300 ppm de cromo.	218
Figura 66: Difratoograma das amostras com 28 dias de hidratação e 300 ppm de zinco.	220
Figura 67: Procedimento de aplicação do RCC e do lodo no sistema de S/E.	224
Figura 68: Imagens dos grãos do agregado reciclado.	227
Figura 69: Imagens dos grãos do agregado leve.	228
Figura 70: Eficiência da sorção dos agregados.	232
Figura 71: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de referências com o traço 1: 3.	236
Figura 72: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas com 8,5 % de resíduo com o traço 1: 3.	236

Figura 73: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de referências com o traço 1: 2,5.	237
Figura 74: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas com 8,5 % de resíduo com o traço 1: 2,5.	237
Figura 75: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas com 100 % de resíduo com o traço 1: 3 e 1: 2,5.	238
Figura 76: Resistência à compressão das amostras com o traço 1: 3 e com 8,5 % de resíduo de galvanoplastia ao longo do tempo.	240
Figura 77: Resistência à compressão das amostras com o traço 1: 2,5 e com 8,5 % de resíduo de galvanoplastia ao longo do tempo.	241
Figura 78: Resistência à compressão das amostras com 100 % de resíduo de galvanoplastia ao longo do tempo, com o respectivo desvio padrão.....	241
Figura 79: Resistência à tração na flexão ao longo do tempo das argamassas com o traço 1: 3 e 8,5 % de resíduo de galvanoplastia. ...	242
Figura 80: Resistência à tração na flexão ao longo do tempo das argamassas com o traço 1: 2,5 e 8,5 % de resíduo de galvanoplastia.	243
Figura 81: Resistência à tração na flexão ao longo do tempo das argamassas com 100 % de resíduo de galvanoplastia.	244
Figura 82: Variação dimensional das argamassas com o traço 1: 3....	246
Figura 83: Variação dimensional das argamassas com o traço 1: 2,5.	247
Figura 84: Variação dimensional das argamassas com 100 % de resíduo.	247
Figura 85: Imagens de MEV da argamassa com agregado leve com molhagem prévia com o traço 1: 3 e 8,5 % de resíduo de galvanoplastia.	254
Figura 86: Imagens de MEV da argamassa com agregado reciclado com molhagem prévia com o traço 1: 3 e 8,5 % de resíduo de galvanoplastia.	254

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais ensaios e desempenho esperado pelo processo de S/E.....	51
Tabela 2: Resistências à compressão mínima dos corpos de prova exigida por cada país para aceitar o processo de S/E.	52
Tabela 3: Ensaio de lixiviação realizados no material granular e monolítico.	55
Tabela 4: Deslocamentos químicos.....	58
Tabela 5: Distância que o fluxo da água alcança na pasta de cimento com variação do período de hidratação.....	69
Tabela 6: Análise química e física dos cimentos utilizados na pesquisa.....	85
Tabela 7: Composição mineral do clínquer pela fórmula de Bogue.	85
Tabela 8: Análise química dos agregados utilizados Brasil.	86
Tabela 9: Análise química dos agregados utilizados Espanha.	87
Tabela 10: Argamassas a serem confeccionadas.....	91
Tabela 11: Argamassas a serem preparadas com incorporação do lodo.....	92
Tabela 12: Propriedades físicas dos agregados utilizados.....	106
Tabela 13: Porcentagem de material cimentício.	107
Tabela 14: Caracterização do agregado reciclado após ataque ácido..	107
Tabela 15: Coeficientes do modelo de GAB (adsorção).....	108
Tabela 16: Porosidade e área específica das frações dos agregados. ..	109
Tabela 17: Análise química do líquido lixiviado das curvas dos agregados.....	111
Tabela 18: Concentração dos elementos solubilizados nas curvas granulométricas do agregado leve e do agregado reciclado.....	112
Tabela 19: Absorção de água por imersão dos grãos.	113
Tabela 20: Equações das retas para obtenção da sorptividade a água das frações dos agregados e das curvas.	115
Tabela 21: Análise química da solução.....	120
Tabela 22: Análise química após o ensaio de conformidade.....	121
Tabela 23: Dados utilizados no cálculo e a quantidade necessária de agregado reciclado ou agregado leve.	124
Tabela 24: Características físicas das argamassas.....	125
Tabela 25: Resultados do ensaio de calor de hidratação.....	128
Tabela 26: Massa específica das argamassas no estado endurecido....	138
Tabela 27: Resistência à compressão das argamassas em cada idade.	139
Tabela 28: Porcentagem de aumento da resistência à compressão.....	142

Tabela 29: Resistência à tração na flexão das argamassas em cada idade.	149
Tabela 30: Porcentagem de aumento da resistência à tração na flexão.	151
Tabela 31: Equação das curvas e variação dimensional das argamassas em diferentes idades.....	157
Tabela 32: Absorção de água e porosidade aberta das argamassas.....	160
Tabela 33: Equações das retas para obtenção da sorptividade à água das amostras e o ângulo de molhamento aparente.....	169
Tabela 34: Permeabilidade ao vapor das amostras ao longo do tempo.	171
Tabela 35: Distância percorrida pela água a partir do agente de cura interna.	175
Tabela 36: Fluxo volumétrico da água nas diferentes idades de hidratação.....	177
Tabela 37: Distribuição de fases da pasta com 1 e 28 dias de hidratação.	179
Tabela 38: Liberação acumulada das 8 extrações do ensaio de tanque, em mg/L.....	182
Tabela 39: Retenção dos metais de interesse pelas argamassas.....	183
Tabela 40: Coeficiente de difusão para o metal de interesse.	187
Tabela 41: Mecanismo de lixiviação do metal de interesse.	188
Tabela 42: Condutividade elétrica do líquido lixiviante após cada extração do ensaio de tanque das argamassas.	189
Tabela 43: pH do líquido lixiviante após cada extração do ensaio de tanque.....	190
Tabela 44: Concentrações dos elementos lixiviados das argamassas, em mg/L.....	191
Tabela 45: Porcentagem de retenção das argamassas após ensaio em meio ácido.	193
Tabela 46: pH e condutividade elétrica do líquido lixiviante após o ensaio de lixiviação (NBR 10005).	193
Tabela 47: Concentrações dos elementos solubilizados das amostras, em mg/L.....	194
Tabela 48: Porcentagem de retenção dos metais de interesse pelas argamassas.	195
Tabela 49: pH e condutividade elétrica do líquido lixiviante após o ensaio de solubilização.....	196
Tabela 50: Resultado da análise de RMN.....	211
Tabela 51: Fases identificadas nos difratogramas.....	215
Tabela 52: Propriedades físicas dos agregados.....	226

Tabela 53: Análise química do líquido lixiviado.	229
Tabela 54: Análise química da solução.	230
Tabela 55: Análise química após o ensaio de conformidade.....	231
Tabela 56: Análise química do resíduo de galvanoplastia.	233
Tabela 57: Análise de fluorescência de raios-X.	233
Tabela 58: Dados do ensaio de calor de hidratação.	235
Tabela 59: Equação da curva e r^2 do ensaio de variação dimensional.	245
Tabela 60: Liberação acumulada das 8 extrações do ensaio de tanque, em mg/L.	248
Tabela 61: Retenção dos metais pesados de interesse pelas argamassas.	249
Tabela 62: Concentração dos elementos lixiviados (mg/L).	250
Tabela 63: Retenção do resíduo de galvanoplastia pelas argamassas.	252
Tabela 64: pH e condutividade elétrica do líquido lixiviante após o ensaio de conformidade.....	253

LISTA DE ABREVIATURAS

a/c = relação água/ cimento;	HSWA = <i>Hazardous and Solid Waste Amendment</i> ;
Abs = absorção;	L/S = líquido lixiviado/ sólido;
AFm = monossulfoaluminato de cálcio;	-log = logaritmo negativo;
AFt = etringita;	MAS = ângulo mágico de rotação;
ALV = agregado leve;	MEV = microscopia eletrônica de varredura;
ASTM = <i>American Society for Testing and Materials</i> ;	Pb ⁴⁺ = chumbo tetravalente;
C ₂ S = silicato dicálcico;	ppm = partes por milhão;
C ₃ A = aluminato tricálcico;	RCC = agregado reciclado oriundo de resíduo de construção civil;
C ₃ S = silicato tricálcico;	RCRA = <i>Resource Conservation and Recovery Act</i> ;
Ca(OH) ₂ = hidróxido de cálcio;	RMN = ressonância magnética nuclear;
CaSO ₄ = sulfato de cálcio;	Rpm = rotação por minuto;
CH = hidróxido de cálcio;	S/E = solidificação/ estabilização;
CI = cura interna;	s ⁻¹ = segundo inverso;
CP = polarização cruzada;	SSS = saturado superfície seca;
Cr ⁶⁺ = cromo hexavalente;	TCLP = <i>Toxicity Characteristic Leaching Procedure</i> ;
CS = retração química do cimento;	UR = umidade relativa;
C-S-H = silicato de cálcio hidratado;	ValoRes = Laboratório de Valorização e Reciclagem de Resíduos Industriais da Construção Civil;
D/d = dimensão máxima de 2,4 mm e mínima de 0,15 mm;	Zn ²⁺ = zinco bivalente;
DRX = difração de raios-X;	ZTI = zona de transição interfacial;
EDX = espectroscopia de energia dispersiva;	
EPA = <i>Environmental Protection Agency</i> ;	
FTIR = espectroscopia de infravermelho;	

LISTA DE SÍMBOLOS

- ϕ_{concreto} = porosidade capilar do concreto;
- α_{max} = máximo esperado do grau de hidratação do cimento;
- $\partial\alpha/\partial t$ = taxa de hidratação para o período de interesse (s^{-1});
- $\partial\varepsilon/\partial t$ = fator de preenchimento (s^{-1});
- μ = viscosidade do fluido (Pa.s);
- μm = micrômetro (10^{-6} metros);
- A = área da amostra;
- C_0 = concentração total de contaminante na massa de partículas sólidas porosas;
- C_{AV} = concentração do contaminante;
- C_f = teor de cimento para mistura de concreto;
- C_L = concentração constante de contaminantes no lixiviado;
- C_s = capacidade térmica (J/K);
- D = coeficiente de degradação;
- D_e = coeficiente de difusão efetiva;
- ε_{64} = lixiviação cumulativa do componente durante 64 dias;
- f = fator igual a $1 s^{-1}$;
- F_{AV} = fator de disponibilidade;
- K = coeficiente de permeabilidade;
- L = comprimento do poro na pasta de cimento;
- m = massa;
- M_0 = massa total de contaminante em partículas sólidas porosas;
- M_{AV} = massa lixiviada de contaminante;
- m_c = massa de cimento (g);
- m_i = quantidade dos compostos do cimento Portland (%);
- M_{LWA} = massa de agregado leve fino (< 4,8 mm);
- MPa = mega pascal (10^6 Pascal);
- N = newton;
- Nm = nanômetro (10^{-9} metros);
- \emptyset = diâmetro;
- Pa = Pascal;
- Pa.s = Pascal-segundo (kg/m.s);
- Q = fluxo volumétrico da água;
- Q_c = calor de hidratação dos compostos separados quando hidratados totalmente (J/g);
- Q_i = calor gerado no tempo i (J/g);
- $Q_{\text{máx}}$ = calor total gerado (J/g);
- R = raio do poro;
- S = grau de saturação do agregado;
- U = quantidade lixiviável;
- α = grau de hidratação (%);
- γ = massa específica;
- ΔP = queda da pressão (Pa);
- ΔT_i = variação da temperatura no tempo i ($^{\circ}\text{C}$);
- ρ = densidade (kg/m^3);
- σ = tensão superficial da água.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	29
1.1	JUSTIFICATIVA.....	30
1.2	CONTRIBUIÇÃO.....	31
1.3	OBJETIVOS.....	33
1.4	ESTRUTURA DA TESE.....	34
2	PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO/ ESTABILIZAÇÃO.....	35
2.1	FIXAÇÃO DOS METAIS NA MATRIZ CIMENTÍCIA.....	37
2.1.1	Hidratação do cimento Portland.....	43
2.1.2	Silicato de cálcio hidratado.....	46
2.2	FIXAÇÃO DE CONTAMINANTES NAS ESTRUTURAS DOS POROS.....	47
2.3	CRITÉRIOS TECNOLÓGICOS PARA VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO PROCESSO SOLIDIFICAÇÃO/ ESTABILIZAÇÃO COM CIMENTO PORTLAND.....	49
2.3.1	Resistência mecânica.....	51
2.3.2	Coefficiente de permeabilidade.....	53
2.3.3	Lixiviação.....	54
2.3.4	Ressonância magnética nuclear.....	56
2.4	SÍNTESE.....	59
3	AGREGADOS LEVES COMO AGENTES DE CURA NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND ...	61
3.1	PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS LEVES	70
3.2	INFLUÊNCIA DO AGREGADO LEVE NA ZONA DE TRANSIÇÃO INTERFACIAL.....	72
3.3	AGREGADO RECICLADO.....	75
3.4	CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA AVALIAR A EFICIÊNCIA DO AGENTE DE CURA.....	78
3.5	SÍNTESE.....	79
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	81
4.1	MATERIAIS.....	84
4.1.1	Água.....	84
4.1.2	Cimento.....	84
4.1.3	Agregados.....	86
4.1.4	Metais pesados.....	87
4.1.5	Resíduo de galvanoplastia.....	88
4.1.6	Preparo das argamassas.....	88
4.1.6.1	Estudo das argamassas com incorporação de metal pesado (material sintético).....	90

4.1.6.2	Estudo da solidificação do resíduo de galvanoplastia – caso real	91
4.2	MÉTODOS E TÉCNICAS ANALÍTICAS.....	92
4.2.1	Análises estatísticas	92
4.2.2	Caracterização das matérias-primas.....	93
4.2.2.1	Absorção granular por imersão.....	93
4.2.2.2	Isotermas de adsorção.....	93
4.2.2.3	Isotermas de desorção	94
4.2.2.4	Ataque ácido	95
4.2.2.5	Perda ao fogo.....	95
4.2.2.6	Sorção dos agregados.....	96
4.2.2.7	Ataque por água régia.....	96
4.2.3	Caracterização das argamassas	97
4.2.3.1	Calor de hidratação	97
4.2.3.2	Variação dimensional	98
4.2.3.3	Absorção de água por capilaridade	99
4.2.3.4	Permeabilidade ao vapor.....	100
4.2.3.5	Microscopia eletrônica de varredura.....	101
4.2.3.6	Ressonância magnética nuclear	102
4.2.3.7	Difratometria de raios-X.....	102
4.2.3.8	Lixiviação	103
4.2.3.8.1	Ensaio de tanque.....	103
4.2.3.8.2	Lixiviação.....	103
4.2.3.8.3	Solubilização	104
4.2.3.8.4	Ensaio de conformidade	104
4.2.3.8.5	Ensaio de dependência do pH.....	104
4.2.3.9	Espectrometria de raios-X por energia dispersiva	105
4.2.3.10	Espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado	105
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	106
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	106
5.1.1	Propriedades físicas dos agregados	106
5.1.2	Ataque ácido no agregado reciclado.....	107
5.1.3	Isotermas.....	108
5.1.4	Lixiviação NBR 10005.....	110
5.1.5	Solubilização	111
5.1.6	Absorção granular por imersão	113
5.1.7	Absorção granular por capilaridade	113
5.1.8	Caracterização micro estrutural.....	115
5.1.9	Sorção dos grãos.....	119
5.1.10	Conclusões parciais	122

5.2 CONSUMO DE AGREGADO COMO AGENTE DE CURA INTERNA	123
5.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS	124
5.3.1 Estado fresco	124
5.3.1.1 Propriedades físicas.....	124
5.3.1.2 Calor de hidratação	127
5.3.1.3 Conclusões parciais.....	136
5.3.2 Estado endurecido	137
5.3.2.1 Propriedade física.....	137
5.3.2.2 Propriedades mecânicas	138
5.3.2.2.1 Resistência à compressão	138
5.3.2.2.2 Resistência à tração na flexão.....	148
5.3.2.2.3 Variação dimensional	156
5.3.2.3 Propriedades de Transporte.....	160
5.3.2.3.1 Absorção por imersão e porosidade aberta	160
5.3.2.3.2 Absorção por capilaridade	164
5.3.2.3.3 Permeabilidade ao vapor.....	170
5.3.2.3.4 Distância percorrida pela água.....	174
5.3.2.3.5 Distribuição de fases da pasta de cimento	178
5.3.2.4 Compatibilidade ambiental	181
5.3.2.4.1 Ensaio de tanque	181
5.3.2.4.2 Ensaio de lixiviação de acordo com NBR 10005 ..	191
5.3.2.4.3 Ensaio de solubilização.....	193
5.3.2.4.4 Ensaio de dependência do pH.....	197
5.3.2.5 Estudo da microestrutura	202
5.3.2.5.1 Microscopia eletrônica de varredura.....	202
5.3.2.5.2 Ressonância magnética nuclear	207
5.3.2.5.3 Difração de Raios-X	215
5.3.2.6 Conclusões parciais.....	221
6 APLICAÇÃO DO LODO DE GALVANOPLASTIA (CASO REAL)	224
6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	225
6.1.1 Propriedades físicas dos agregados	225
6.1.2 Lixiviação	228
6.1.3 Sorção dos agregados	229
6.1.4 Conclusões parciais	232
6.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE GALVANOPLASTIA	232
6.3 CARACTERIZAÇÃO DO LODO SOLIDIFICADO	234
6.3.1 Estado fresco	234
6.3.1.1 Calor de hidratação	234

6.3.1.2	Conclusões parciais.....	238
6.3.2	Lodo solidificado	239
6.3.2.1	Resistência à compressão.....	239
6.3.2.2	Resistência à tração na flexão	242
6.3.2.3	Variação dimensional	244
6.3.2.4	Compatibilidade ambiental	248
6.3.2.4.1	Ensaio de tanque.....	248
6.3.2.4.2	Ensaio de conformidade	249
6.3.2.5	Microscopia eletrônica de varredura.....	253
6.3.2.6	Conclusões parciais.....	255
7	CONCLUSÕES GERAIS	257
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	259
8	REFERÊNCIAS.....	260
9	APÊNDICES	281
9.1	APÊNDICE 1: TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA – ANOVA.....	282
9.2	APÊNDICE 2: DESVIO PADRÃO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	284
9.3	APÊNDICE 3: CARACTERÍSTICAS DO LODO NO PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO	286
9.4	APÊNDICE 4: TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA ..	297

1 INTRODUÇÃO

A solidificação/estabilização (S/E) é um processo de tratamento de resíduos, principalmente lodos industriais e solos contaminados, amplamente empregado para redução de riscos de liberação dos contaminantes, em especial metais pesados. O cimento Portland é o aglomerante que vem sendo utilizado nesses processos de tratamento, onde por fenômenos físicos e/ou químicos o metal pesado é aprisionado, estabilizado e/ou retido na matriz de cimento, reduzindo a solubilidade e mobilidade dos metais. Esse processo se baseia na hidratação do cimento, de modo que os produtos hidratados interagem com o metal, alterando-o ou formando novos compostos (dependendo do metal a ser estabilizado na matriz).

Dois fenômenos estão envolvidos no processo de S/E: a solidificação e a estabilização. Onde a solidificação ou encapsulamento muda a forma física, mas não causa ligações químicas dos contaminantes do resíduo com o aglomerante. Já, a estabilização química muda os estados químicos dos constituintes do resíduo transformando-os em formas menos solúveis em água. O mecanismo de solidificação é um processo físico onde os contaminantes tóxicos dos resíduos são aprisionados na matriz sólida. Do ponto de vista científico, o termo estabilização é usualmente empregado para qualificar os processos que venham assegurar uma retenção química dos poluentes (EPA, 1999; GRAHAM *et al.*, 2006; TORRAS *et al.*, 2011).

O processo de solidificação/estabilização é totalmente dependente da formação de produtos de hidratação estáveis que se combinam aos componentes do resíduo e proporcionam um produto solidificado com resistência e estabilidade dimensional. Ao utilizar o cimento Portland a vida útil desses materiais está diretamente relacionada à sua capacidade de impedir a entrada de substâncias deletérias, sendo afetada pela presença de fissuras e poros. Nesse sentido, uma cura adequada contribuirá para uma melhor hidratação e conseqüentemente no aumento da formação dos produtos hidratados.

A cura interna, que tem como objetivo fornecer água adicional para a hidratação do cimento, sendo essa água fornecida por reservatórios internos (agregados porosos, absorventes e com baixa massa específica, como o agregado leve) que são, geralmente, utilizados saturados previamente ao preparo do material cimentício (HAN *et al.*, 2014). Para Bentz, Lura e Roberts (2005) a água adicional pode ser distribuída uniformemente em toda a matriz cimentícia e prontamente capaz de atingir os grãos de cimento não hidratados. Assim, a cura interna pode melhorar

a hidratação do cimento, compensar a auto dessecação e evitar fissuras no material devido à retração por secagem e autógena (BENTZ, 2009; CASTRO, 2011; GOLIAS, CASTRO e WEISS, 2012; HE et al., 2014; BOGAS, BRITO e FIGUEIREDO, 2015). Partindo desse princípio, a cura interna poderá melhorar a zona de transição interfacial, deixando a pasta cimentícia menos porosa e permeável, auxiliando para o encapsulamento físico dos metais pesados na matriz cimentícia.

Deste modo, o agregado reciclado oriundo de resíduos da construção civil (RCC¹) também pode auxiliar na melhora da zona de transição interfacial, uma vez que o material é absorvente e apresenta uma superfície rugosa o que ajuda para uma melhor interação da pasta de cimento com o agregado, semelhante ao agregado leve. Assim, alguns autores, ao utilizar o agregado reciclado saturado previamente com água (para evitar que o agregado absorva parte da água da mistura) e verificarem a melhora causada na hidratação do material cimentício final, concluíram que o agregado reciclado pode ser considerado um agente de cura interna (KOVLER e JENSEN, 2007; RILEM TC-196, 2007; KIM e BENTZ, 2008; KOU, POON e ETXEBERRIA, 2011; YILDIRIM, MEYER e HERFELLNER, 2015). Desta forma, seria viável a utilização do agregado reciclado saturado como agente de cura, aumentando o consumo desse material.

A principal motivação deste trabalho foi propor um procedimento que pudesse prever a contribuição dos agregados porosos, no desempenho mecânico e ambiental, para futuras aplicações como agente de cura interna para contribuir na retenção de metais pesados nos processos de solidificação/ estabilização.

Por isso, neste trabalho buscou-se avaliar, em condições controladas de laboratório, o cromo hexavalente, o chumbo tetravalente e o zinco bivalente em argamassas com agregado leve e agregado reciclado. Buscando avaliar a eficiência do agregado reciclado como possível agente de cura interna e identificar o seu potencial na retenção dos metais pesados.

1.1 JUSTIFICATIVA

A preocupação com o meio ambiente e com as áreas de disposição de resíduos sólidos e líquidos devido a descartes irregulares tem sido o foco crescente de estudos para estabelecer procedimentos que

¹ Entende-se por RCC os resíduos provenientes de atividades de construção, reforma e demolição de acordo com a Resolução CONAMA (2002).

minimizem os impactos nocivos e reduzam o consumo das matérias-primas finitas. Com isso, há uma grande preocupação voltada para os metais pesados liberados no meio ambiente e o aumento da quantidade de resíduos da construção civil descartados irregularmente, sendo que a reciclagem e/ou a reutilização dos resíduos da construção civil podem reduzir o uso de recursos naturais.

O crescente interesse no desenvolvimento sustentável faz o tratamento de metais pesados uma prioridade. Os resíduos perigosos contendo metais pesados causam sérios problemas ambientais, principalmente relacionados à contaminação de água, ar e solo. Sendo esta uma questão que merece atenção para encontrar alternativas apropriadas para reter ou reduzir os riscos de contaminação por metais pesados. Uma alternativa é o processo de solidificação/ estabilização que tem sido o processo mais amplamente usado no tratamento final de resíduos perigosos. Esse processo fixa os metais pesados por sorção, incorporação na estrutura e precipitação durante a hidratação do cimento. Um dos problemas desse processo é a falta de conhecimento das interações e a formação de fases amorfas que são difíceis de identificar, sendo estas de extrema importância para o controle da qualidade do material final. Outro problema é os metais interferirem nas reações de hidratação da pasta, retardando ou acelerando estas reações.

Desta forma, este trabalho busca contribuir para o desenvolvimento de um material monolítico com desempenho satisfatório para a gestão de metais pesados, oriundos de resíduos perigosos com alto teor de líquido, devido a sua obtenção antes do processo de filtro prensa. Para isso, será realizada a junção do processo de solidificação/ estabilização com a cura interna do material cimentício para o encapsulamento dos metais pesados no cimento Portland e nos grãos do agregado leve. Avaliando a eficácia do agregado reciclado na cura interna e na retenção do metal pesado.

1.2 CONTRIBUIÇÃO

Com esta pesquisa pretende-se contribuir para uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos no processo de solidificação/ estabilização (S/E) e as influências ocasionadas pela incorporação de metais pesados nas matrizes cimentícias, bem como propor melhorias ao desempenho do processo de S/E pela incorporação de agregado reciclado como agente de cura. Do mesmo modo, espera-se contribuir para um melhor entendimento dos processos envolvidos na cura interna dos materiais cimentícios, como o transporte de água do agregado leve, o cami-

nho percorrido pela água e a melhora causada na zona de transição interfacial.

Este trabalho contribui com a Lei 12305 de 2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, o artigo 13 classifica os resíduos da construção civil como resíduo gerado na construção, reforma, reparo e demolição. Já, o artigo 35 determina que uma vez gerado o resíduo, o mesmo deve ser reutilizado, tratado e a sua disposição final deve ser ambientalmente adequada. Como também, contribui com a resolução CONAMA nº 307 de 2002 e com a resolução nº 448 de 2012, para a redução efetiva dos impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos da construção civil, uma vez que a disposição destes resíduos em locais inadequados contribui para a degradação da qualidade ambiental.

À relevância desta pesquisa, encontra-se no metal pesado analisado, uma vez que o cromo hexavalente (Cr^{6+}) é o foco de muitos estudos por ser a forma mais prejudicial para a saúde humana e para o meio ambiente, devido à sua maior toxicidade, solubilidade e mobilidade em relação a sua forma trivalente (Cr^{3+}), por isso é de difícil retenção na matriz de cimento, até mesmo pelo processo de S/E. Por esse motivo, muitos autores estudam a incorporação do Cr^{6+} em matrizes cimentícias com adições variáveis, tais como aditivos, cinza volante, escória de alto forno, cinza do bagaço da cana de açúcar, entre outros, para potencializar a eficiência da retenção/ estabilização. Porém, esses métodos, ainda não foram eficazes para a retenção total do Cr^{6+} , no entanto ocorreram reduções significativas da lixiviação desse metal para o meio ambiente (KINDNESS, MACIAS e GLASSER, 1994; RINEHART *et al.*, 1997; LAFOREST e DUCHESNE, 2005; GIERGICZNY e KRÓL, 2008; SHI e KAN, 2009; BOBIRICA *et al.*, 2010; PERRAKI *et al.*, 2010; LASHERAS-ZUBIATE *et al.*, 2012; TANTAWY, EL-ROUDI e SALEM, 2012; LI *et al.*, 2014a).

Uma explicação para a dificuldade de estabilização do cromo na matriz de cimento está ligada ao aumento da porosidade das pastas de cimento quando incorporado o Cr^{6+} (DIET, MOSZKOWICZ e SORRENTINO, 1998).

Nesse sentido, está pesquisa é importante, pois conforme verificado pelos autores acima, a solidificação/ estabilização do cromo hexavalente é complexa e não completamente entendida, resultando em um problema constante devido ao alto grau de contaminação desse metal, do mesmo modo ainda existem aspectos do processo de S/E que necessitam mais estudos para melhor compreensão (mecanismos envolvidos, interferências químicas, eficácia dos mecanismos de imobilização, desempe-

nho em longo prazo e comportamento ao processo de lixiviação do material tratado).

Este trabalho partiu do pressuposto que o agregado reciclado adicionado na argamassa saturado previamente (em uma solução aquosa de metal pesado na forma de sal) irá trabalhar como agente de cura, assim uma parte da solução aquosa ficará absorvida nos poros do agregado e a outra parte será liberada durante a hidratação do cimento, conforme a necessidade, auxiliando para a retenção do metal nos produtos hidratados do cimento por fenômenos físicos e químicos, bem como pela retenção nos poros do agregado, conseqüentemente melhorando as propriedades físicas, químicas e mecânicas do compósito final.

Por fim, o trabalho proposto apresenta como ineditismo a investigação da utilização do agregado reciclado como sorvente químico em matrizes cimentícias promovendo uma maior eficiência do processo de solidificação/ estabilização e auxiliando para uma estrutura mais durável e, conseqüentemente menos permeável e porosa devido à cura interna também fornecida pelo agregado reciclado.

1.3 OBJETIVOS

Tem-se como objetivo geral avaliar o potencial de retenção de metais pesados pela incorporação do agregado reciclado como sorvente químico e produto de cura interna no processo de solidificação/ estabilização com cimento Portland.

E como objetivos específicos:

- a) Identificar a contribuição do tamanho e sorptividade dos grãos de agregado reciclado na hidratação do cimento;
- b) Desenvolver argamassas com agregado reciclado proporcionando a cura interna;
- c) Imobilizar os metais pesados (Cr^{6+} , Pb^{4+} e Zn^{2+}) no agregado e na matriz cimentícia com o auxílio do mecanismo da cura interna e do processo de solidificação/ estabilização;
- d) Propor um procedimento de incorporação do agregado reciclado no processo de solidificação/ estabilização do resíduo de galvanoplastia (em caso real);
- e) Identificar os mecanismos de aprisionamento dos metais pesados.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

O presente documento encontra-se estruturado em sete capítulos: O primeiro capítulo consiste da introdução e justificativa do trabalho, bem como a contribuição e os objetivos. O segundo e o terceiro capítulo apresentam o levantamento bibliográfico sobre o processo de solidificação/ estabilização, a cura interna dos agregados leves e os parâmetros que são influenciados por esses, no processo de hidratação, formação da microestrutura e zona de transição interfacial do produto final. O quarto capítulo aborda os materiais e métodos empregados, descrevendo os procedimentos experimentais utilizados para a realização de cada etapa da pesquisa. No quinto e sexto capítulos são descritos e analisados os resultados desta pesquisa. Finalmente, no sétimo capítulo está descrito as conclusões do trabalho, seguido pelas sugestões para trabalhos futuros e as referências bibliográficas utilizadas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO/ ESTABILIZAÇÃO

O processo de solidificação/ estabilização (S/E) começou a ser utilizado com a criação da Agência de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency - EPA*) em 1970 nos Estados Unidos. Entretanto apenas em 1976, com a criação da Lei de Recuperação para Preservação dos Recursos (*Resource Conservation a Recovery Act - RCRA*), a EPA obteve autoridade para monitorar resíduos perigosos, desde sua criação até que sejam reciclados, tratados e/ou eliminados. Já, em 1984 foi criada a Emenda de Resíduos Sólidos e Perigosos (*Hazardous and Solid Waste Amendment - HSWA*) para resolver as limitações da RCRA.

Os processos de solidificação e estabilização são dois processos distintos. Solidificação é o processo de encapsular o contaminante em uma matriz suficientemente sólida, não envolvendo, necessariamente, interações químicas entre o aglomerante e o metal pesado, sendo que a redução da migração dos contaminantes ocorre, geralmente, pela redução da área superficial exposta à lixiviação e/ou pelo isolamento dos resíduos em materiais de baixa permeabilidade. Já, no processo de estabilização ocorre à alteração química do contaminante, minimizando quimicamente o potencial de periculosidade, transformando-o em uma forma menos solúvel, com mobilidade e toxicidade reduzida. A estabilização ocorre pela conversão do contaminante na fase líquida (móvel) para uma fase sólida (imóvel) por reações, como precipitação, sorção ou substituição (EPA, 1999; GRAHAM *et al.*, 2006; TORRAS *et al.*, 2011).

Após o processo de S/E espera-se que o produto final, antes considerado perigoso, seja classificado como inerte ou não perigoso, podendo ser utilizado na construção civil, não contaminando as águas subterrâneas e o solo (EPA, 1999; MALVIYA e CHAUDHARY, 2006; HAQUE, 2016).

Para esse processo, o material mais utilizado como aglomerante é o cimento Portland, devido à disponibilidade e, principalmente, às suas propriedades físico-químicas e mecânicas quando em contato com a água, tais como baixa permeabilidade, baixa difusividade e elevada resistência mecânica. Assim como, a matriz de cimento atua como uma barreira de difusão e proporciona locais de sorção (como o silicato de cálcio hidratado que contribui para o processo de sorção química, devido à alta superfície específica, em torno de 5 a 200 m²/g); possibilita a

precipitação dos metais em hidróxidos, devido à existência de um meio alcalino decorrente das reações de hidratação (OJOVAN e LEE, 2014).

As fases associadas formadas no processo de S/E com metais pesados, em matriz cimentícia, são geralmente amorfas ou pouco cristalinas, pois os metais podem ser fisicamente encapsulados pelo C-S-H, dificultando a caracterização (CHEN *et al.*, 2009).

Ao incorporar resíduos perigosos nas matrizes de cimento é necessária avaliar a efetividade do processo de S/E, para isso os parâmetros comumente utilizados são resistência mecânica, coeficiente de permeabilidade e lixiviação. Uma vez que, os resíduos perigosos podem interferir nos produtos de hidratação (silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), monossulfoaluminato de cálcio (AFm) e trissulfoaluminato de cálcio (AFt)), resultando em desempenho desfavorável do material final, perante a durabilidade, as características físicas e de lixiviação (HODUL e DROCHYTKA, 2016).

Essa interferência dos metais pesados dos resíduos perigosos nos produtos de hidratação do cimento Portland, pode alterar, também, o desenvolvimento da hidratação (retardar ou acelerar a solidificação da pasta de cimento) e, conseqüentemente, causar um desempenho adverso no material, tal como redução da resistência mecânica e aumento da permeabilidade, sendo que a extensão depende da quantidade e do contaminante (CIOFF, LAVORGNA e SANTORO, 2002; MALVIYA e CHAUDHARY, 2006; GINEYS, AOUAD e DAMIDOT, 2010 e 2011). A literatura a esse respeito é contraditória, pois a interferência do metal com a hidratação do cimento depende do teor do metal pesado, de quais metais pesados e outras características do resíduo. Para Weeks, Hand e Sharp em 2008, o retardo no desenvolvimento de resistência é devido à formação de hidróxido de cálcio do metal (por exemplo, zinco ou plumbato). Esta reação consome os íons de cálcio e hidróxido da solução, atrasa a supersaturação e a precipitação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e o desenvolvimento do gel de C-S-H. Enquanto, Chen *et al.* (2009) atribui o retardo da hidratação à redução da permeabilidade causada por reações dos metais, ou seja, a precipitação de géis coloidais contendo metais nas superfícies dos grãos de cimento.

O desempenho dos materiais tratados pelo processo de S/E é influenciado por solicitações internas e externas. Sendo que, nas solicitações internas estão incluídos fatores químicos e físicos inerentes ao material, bem como parâmetros específicos do local que será colocado o produto do processo de S/E. Os principais aspectos físicos são: o tamanho das partículas (tais como granular ou material monolítico), o coeficiente de permeabilidade e a porosidade. Enquanto, o principal aspecto

químico é o pH do material, no que se refere ao desempenho à lixiviação e o desempenho estrutural (por exemplo, a dissolução de fases minerais proporcionando resistência) (REYES *et al.*, 2011).

Já, as solicitações externas (como transporte de umidade, erosão, ataque ambiental pelo ácido, gás carbônico, oxigênio, cloro ou sulfato) tendem a alterar as propriedades físicas ou químicas e o desempenho em longo prazo dos materiais tratados por S/E. A durabilidade física da matriz do produto do processo de S/E pode ser influenciada por fissuração da estrutura monolítica (a partir de ciclos de imersão-secagem ou solicitações mecânicas, por exemplo). Enquanto alterações químicas do material podem comprometer a capacidade de reter contaminantes (como neutralização da água intersticial e reações de precipitação) por meio da interação com o meio ambiente. No entanto, muitos desses processos de degradação e envelhecimento são lentos, tornando o processo de S/E eficaz durante períodos prolongados de tempo. Bem como, o desempenho depende de combinações desses fatores, de tal modo que pequenas variações nas solicitações internas ou externas, normalmente, não levam a falhas catastróficas do desempenho do material (REYES *et al.*, 2011).

2.1 FIXAÇÃO DOS METAIS NA MATRIZ CIMENTÍCIA

O nível de imobilização dos íons de metais pesados depende fortemente do tempo de hidratação do material, pois com o aumento da hidratação reduz a permeabilidade e a porosidade, formando uma estrutura homogênea e compacta, como também possibilita maior interação química entre os produtos de hidratação e os metais pesados (GIERGICZNY e KRÓL, 2008; BULUT, OZVERDI e ERDEM, 2009; HODUL e DROCHYTKA, 2016); e das propriedades do metal, tais como conteúdo orgânico, conteúdo inorgânico, viscosidade, tamanho e distribuição das partículas, pois cada metal tem uma influencia diferente com os produtos de hidratação do cimento, por exemplo, o chumbo e o zinco interferem no mecanismo de hidrólise da pasta (CIOFF, LAVORGNA e SANTORO, 2002; MALVIYA e CHAUDHARY, 2006; SRIVASTAVA, CHAUDHARY e KHALE, 2008; JANTZEN *et al.*, 2010; GINEYS, AOUD e DAMIDOT, 2010 e 2011; HODUL e DROCHYTKA, 2016). Assim como, deve ser controlado o efeito da porcentagem de resíduos perigosos incorporado no material solidificado, pois a porcentagem de resíduo influencia no tempo necessário para o início da hidratação, no grau da hidratação total, no desenvolvimento da resistência e, conseqüentemente, na sua estabilização (GIERGICZNY e KRÓL, 2008; BULUT, OZVERDI e ERDEM, 2009).

Os mecanismos de imobilização de metais pesados no processo de S/E com cimento incluem: (a) fixação química dos contaminantes e interações químicas entre os produtos de hidratação do cimento e os contaminantes (VAN DER SLOOT, 2000; GIERGICZNY e KRÓL, 2008; BULUT, OZVERDI e ERDEM, 2009; BENARD *et al.*, 2009; PINTO *et al.*, 2010; HEKAL *et al.*, 2011; GINEYS, AOUAD e DAMIDOT, 2011; OJOVAN e LEE, 2014; HODUL e DROCHYTKA, 2016; VOLLPRACHT e BRAMESHUBER, 2016); (b) adsorção física dos contaminantes na superfície dos produtos de hidratação do cimento (VAN DER SLOOT, 2000; SRIVASTAVA, CHAUDHARY e KHALE, 2008; BULUT, OZVERDI e ERDEM, 2009; CHEN *et al.*, 2009; GINEYS, AOUAD e DAMIDOT, 2011; HEKAL *et al.*, 2011) e; (c) encapsulamento físico dos resíduos contaminados (baixa permeabilidade das pastas no estado endurecido) (VAN DER SLOOT, 2000; GIERGICZNY e KRÓL, 2008; SHI e KAN, 2009; CHEN *et al.*, 2009; TANTAWY, EL-ROUDI e SALEM, 2012; HODUL e DROCHYTKA, 2016). Os três aspectos dependem da natureza dos produtos de hidratação e dos contaminantes, contudo o terceiro aspecto refere-se também as características da estrutura dos poros da pasta (VAN DER SLOOT, 2000; HEKAL *et al.*, 2011).

Os mecanismos de retenção dos metais pesados podem ser por precipitação, sorção de superfície, troca iônica, retenção estrutural. A força das ligações envolvidas na retenção dos metais pesados varia de um mecanismo para o outro. O principal mecanismo de fixação química dos metais pesados nos produtos de hidratação do cimento Portland é através da precipitação química de espécies de baixa solubilidade. A precipitação dos metais no processo de S/E ocorre sob condição alcalina, o metal precipita como hidróxido, e em seguida envolve reações deste precipitado com outros componentes (cálcio, alumina, sílica, íon OH⁻) para obter uma completa precipitação. Estas reações secundárias exigem tempos longos para ocorrerem e, portanto, o potencial de imobilização será mais eficiente quanto maior for o tempo de cura (BULUT, OZVERDI e ERDEM, 2009).

A nucleação e agregação de compostos de metais pesados ocorrem muito rapidamente, devido a isso as espécies não tem tempo suficiente para se orientarem e os compostos de metais pesados formam estruturas amorfas ou pouco cristalinas em pastas de cimento (VAN DER SLOOT, 2000). Por isso, que os compostos de metais pesados nos resíduos solidificados, geralmente, não são estáveis (CHEN *et al.*, 2009).

O principal componente de ligação do processo de S/E são os produtos de hidratação do cimento (géis de C-S-H, portlandita e etringita) (GIERGICZNY e KRÓL, 2008; BULUT, OZVERDI e ERDEM, 2009; BENARD *et al.*, 2009; VOLLPRACHT e BRAMESHUBER, 2016; HODUL e DROCHYTKA, 2016). A presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tem a função de manter o valor de pH suficientemente alto para que os contaminantes não sejam liberados da matriz do produto solidificado, assim como, deve-se verificar a mobilidade do íon Ca^{2+} dentro da matriz de cimento, pois o cálcio lixiviado pode derivar, principalmente, da dissolução da portlandita e da dessorção do silicato de cálcio hidratado (ZAMPORI, STAMPINO e DOTELLI, 2009; HODUL e DROCHYTKA, 2016).

A adsorção física dos metais pesados na superfície dos produtos de hidratação do cimento ocorre quando os contaminantes na solução (água dos poros) são atraídos para as superfícies das partículas por causa das cargas opostas, sendo os cátions dos metais pesados atraídos pelo oxigênio do C-S-H. A adsorção química refere-se à alta afinidade que, geralmente, ocorre através da ligação covalente. Na precipitação de produtos de hidratação de cimento, os íons de metais pesados podem ser adsorvidos em suas superfícies e, em seguida, entrar na rede para formar uma solução sólida, alterando suas estruturas (cristalinidade, tamanho de partícula) e solubilidade (VAN DER SLOOT, 2000; SRIVASTAVA, CHAUDHARY e KHALE, 2008; BULUT, OZVERDI e ERDEM, 2009; CHEN *et al.*, 2009; GINEYS, AOUAD e DAMIDOT, 2011; HEKAL *et al.*, 2011; HODUL e DROCHYTKA, 2016).

O encapsulamento físico dos metais pesados é ocasionado por uma estrutura homogênea, compacta, com pouca presença de vazios na microestrutura (baixa permeabilidade e porosidade) dos produtos solidificados, bem como os compostos de metal pesado podem ser encapsulados fisicamente pelo C-S-H (VAN DER SLOOT, 2000; GIERGICZNY e KRÓL, 2008; SHI e KAN, 2009; CHEN *et al.*, 2009; TANTAWY, EL-ROUDI e SALEM, 2012; HODUL e DROCHYTKA, 2016). A fase C-S-H, devido a fatores como absorção e baixa permeabilidade, impede a migração de líquidos e a presença de pequenos poros de gel (micro poros), assim, tem um importante papel no potencial de imobilização dos metais (CHEN *et al.*, 2009).

A estabilização de resíduo contendo cromo foi evidenciada através da reação do cromo com o hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento, de acordo com Pinto *et al.* (2010). Os autores também realizaram um estudo por ressonância magnética nuclear (RMN) e detectaram que ocorre um atraso na hidratação do cimento com adição do resí-

duo de cimento. Em termos de resistência, o aumento do teor do resíduo na amostra diminuiu a resistência à compressão, bem como, aumenta a porosidade total, o mesmo foi verificado por Napia *et al.* (2012) e Lasheras-Zubiate *et al.* (2012). Isso ocorreu pela influência do resíduo com a hidratação, reduzindo a quantidade de produtos hidratados.

Já, para Bulut, Ozverdi e Erdem (2009) o cromo hexavalente pode ser imobilizado com quantidades crescentes de FeSO_4 no produto solidificado. Para Vollpracht e Brameshuber (2016) ambos Cr^{3+} e Cr^{6+} podem ser retidos pela etringita. O Cr^{3+} substitui o alumínio enquanto que o Cr^{6+} substitui o sulfato. O Cr^{3+} pode substituir o Al na maioria das fases do hidrato de aluminato de cálcio ou precipitar como hidróxido de cromo, $\text{Cr}(\text{OH})_3$. Porém, para Giergiczny e Król (2008) o Cr^{6+} é difícil de imobilizar e pode ser ligado com SO_4^{-2} . A ligação/ liberação dos metais pesados são comparáveis à dissolução dos componentes do clínquer e a precipitação dos produtos de hidratação (VOLLPRACHT e BRAMESHUBER, 2016).

Resultados recentes de Hodul e Drochytka (2016) mostraram (com o auxílio de técnicas de MEV, ATD e DRX) que a microestrutura do produto solidificado (20 % de cimento Portland, 40 % de cinza volante e 40 % de resíduo de galvanoplastia) consiste, principalmente, de fases amorfas de C-S-H, quartzo, gesso (cuja formação está relacionada fortemente com o alto teor de sulfatos do resíduo), etringita (capaz de incorporar na sua estrutura metais pesados contidos no resíduo de galvanoplastia) e carbonato de cálcio (ocorre, principalmente devido à aplicação de cimento como agente de solidificação). Os autores também verificaram a presença de portlandita durante as fases iniciais da hidratação e perceberam que as mesmas foram carbonatadas e que a maior parte dos contaminantes contidos no resíduo, foram imobilizados na matriz do produto solidificado, principalmente, por incorporação nos produtos de hidratação da matriz. Como também, o teor adicionado do resíduo contendo metais pesados não influenciou negativamente na hidratação da matriz de cimento do produto solidificado. Com base nos resultados das análises realizadas, pode-se supor que a maior parte dos contaminantes contidos nos resíduos foi imobilizada nas matrizes do produto solidificado principalmente por incorporação nos produtos de hidratação da matriz.

Quando a solução salina de nitrato de zinco foi adicionada durante o preparo da pasta de cimento, os íons de Zn^{2+} estavam imediatamente disponíveis e reagiram com as fases do cimento. Os hidratos foram formados contendo o zinco e crescem em torno dos grãos anidros de cimento. Esses hidratos parecem ser responsáveis pelo efeito retardo na

hidratação do cimento, bloqueando, temporária ou permanentemente, a hidratação dos grãos anidros (GINEYS, AOUAD e DAMIDOT, 2011).

Para Gineys, Aouad e Damidot (2010 e 2011) ocorre um atraso na hidratação da pasta de cimento quando incorporado, durante a fabricação na forma de sais, nitrato de cobre, nitrato de chumbo, nitrato de cádmio ou nitrato de zinco, devido a influencia desses metais com a hidratação do C_3S , sendo o chumbo e o cobre fixados no tetraedro de silício do C-S-H, enquanto o zinco e cádmio precipitam como hidróxidos ou óxidos.

Já, ao adicionar chumbo ($Pb(NO_3)_2$) na água de mistura da pasta de cimento Portland, Benard *et al.* (2009) observaram que o metal pesado apresenta uma fraca afinidade com as fases de aluminato de cálcio (precipitação do PbO), porém é fortemente retido pelas fases hidratadas provenientes da hidratação do C_4AF . E como, a principal diferença entre as fases hidratadas do C_3A e C_4AF é a ocorrência da fase hidratada ferrita, os autores concluíram que a forte retenção do chumbo ocorre nessa fase. Bem como, observaram a retenção do chumbo no C-S-H com prováveis ligações com o silicato Q_1 ou Q_2 . Por análises de fluorescência de raios-X, os autores verificaram ligação Pb-O, Pb-Ca, Pb-Si e Pb-Fe.

O chumbo interfere no mecanismo de hidrólise da pasta, quando na presença de Pb misturado a sais básicos, nitratos ou sulfatos, ocorre à formação de camadas ao redor dos grãos de clínquer, e com as variações do pH, estes sais podem precipitar. Os sais precipitados de Pb podem formar um gel que se expande provocando microfissuras, reduzindo a estabilidade e as propriedades mecânicas (SRIVASTAVA, CHAUDHARY e KHALE, 2008). Além disso, o chumbo retarda a hidratação do cimento Portland por meio da formação de um revestimento na superfície dos grãos de cimento por hidróxidos de metais pesados, ou seja, pela influencia do metal com a hidratação do C_3S (GINEYS, AOUAD e DAMIDOT, 2010 e 2011). Entretanto, os compostos formados pelo chumbo apresentam baixa solubilidade. A solubilidade das diferentes espécies de chumbo depende do pH do meio, em pH básico, como do cimento, geralmente são insolúveis.

De acordo com Wang *et al.* (2015) a água do poro do cimento Portland com pH entre 12,5 e 13,5 limita a mobilidade de muitos metais pesados (como chumbo, zinco, cromo, cobre, níquel), diminuindo a sua solubilidade, precipitando como hidróxidos e aumentando a sua sorção nas fases minerais do cimento (C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF).

A relação entre os valores de pH e a solubilidade do hidróxido é um determinante fundamental da lixiviação de metais pesados, uma vez que o pH do lixiviado governa a solubilidade dos hidróxidos metálicos.

Para Wang *et al.* (2015) a concentração de lixiviados de níquel em pH 6-9 foi inferior ao seu limite de solubilidade; com o pH entre 10-13, as concentrações de lixiviados de níquel foram distribuídas, principalmente, acima da solubilidade do hidróxido metálico. Enquanto, o cobre segue a mesma tendência de liberação que a sua curva de solubilidade. Já, em relação ao zinco, a sua lixiviação foi ligeiramente inferior ao limite de solubilidade a pH 6-9, no entanto, sob o pH 9-12 as concentrações de zinco foram distribuídas ao longo da sua curva de solubilidade.

Para Lu *et al.* (2016) a lixiviação do metal é afetada pelos tamanhos de partículas de resíduos sólidos, com dissolução mais rápida ocorrendo para aquela com maiores áreas superficiais.

No ensaio de lixiviação (EA NEN 7375), após 64 dias, os metais pesados adicionados na forma de sais foram efetivamente imobilizados em matrizes cimentícias (retenção de 99,6 % para o Pb e 99,9 % para o Zn). Entretanto, para o Cr^{+6} a retenção não foi efetiva (em torno de 70 a 75 %) e aproximadamente 80 % do cromo lixiviado foi liberado nos primeiros 25 dias. Isso pode ser explicado pelas fases formadas pelos metais, sendo que o cromo tende a estar essencialmente na forma de íon cromato (CrO_4^{-2}) e o Pb e o Zn aparecem na forma de hidróxidos ou como parte da rede de silicatos, permitindo a adsorção por imobilização para a fase C-S-H. Em idades posteriores ocorre uma redução da lixiviação do metal (cromo, chumbo e zinco) (LASHERAS-ZUBIATE *et al.*, 2012), pelo aumento do grau de hidratação, o que auxilia para a retenção dos metais pela redução da porosidade.

Para Giergiczny e Król (2008), Shi e Kan (2009) e Tantawy, El-Roudi e Salem (2012) os resíduos a serem estabilizados também podem participar em idade posterior na formação de uma estrutura compacta, densa e durável, devido à sua finura e composição química, a qual reduz a porosidade da matriz. Isso foi comprovado por medidas de porosidades em argamassas com cimento Portland, cinza volante e sais solúveis de Pb^{+2} , Zn^{+2} , Cu^{+2} , Cd^{+2} e Cr^{+6} , em diferentes tempos de hidratação. A porosidade total diminuiu com o tempo e a estrutura dos poros mudou pela precipitação de hidróxidos de metais pesados. A proporção de pequenos poros de gel aumenta quando os poros capilares são reduzidos (GIERGICZNY e KRÓL, 2008).

Os compostos com alto teor (70 %) de adições minerais apresentam desenvolvimento de resistência significativo em idade posterior, quando os componentes ativos entram na reação com Ca(OH)_2 e formam-se os hidratos de aluminato de cálcio e silicato. A cristalização destes novos produtos ocorre nos poros da matriz cimentícia endurecida

e, portanto, a porosidade é reduzida e a durabilidade aumenta (GIERGICZNY e KRÓL, 2008).

A resistência à compressão do produto do processo de S/E aumenta com o aumento do valor de pH (de 7 para 12,5), pois em pH inferior a 10,8 o C-S-H não é estável e pode se dissolver, reduzindo a resistência (WANG *et al.*, 2015).

Para cada metal pesado, existe pelo menos um caso de forte retenção. A força das ligações envolvidas na retenção dos metais pesados varia de um mecanismo para o outro. A capacidade dos metais pesados em ser removidos por lixiviação é controlada em grande parte por essas forças. Portanto, essas interações entre hidratos do cimento e metais pesados devem ser consideradas na realização de estudos de longo prazo da lixiviação de cimento.

2.1.1 Hidratação do cimento Portland

O processo de solidificação/ estabilização (S/E) baseado no uso do cimento Portland como aglomerante, é influenciado pelas reações de hidratação dos compostos do cimento (C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF)², que se desenvolvem e contribuem para a resistência mecânica do produto final.

A hidratação do cimento Portland pode ser dividida em quatro períodos, sendo eles: (I) período inicial (com duração de alguns minutos): no contato com a água os grãos de cimento começam a reagir, formando o primeiro pico de liberação de calor, esse pico é principalmente devido à reação do C_3A com o $CaSO_4$ (sulfato de cálcio) e água para formar a etringita. Em seguida tem-se o (II) período dormente (com duração de minutos a horas): várias horas com pouca hidratação, devido à formação de uma camada protetora de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) em torno dos grãos de cimento e pelo fato da solução nos poros estar insaturada de hidróxido de cálcio (CH), reduzindo a hidratação das fases anidras. Passado algumas horas começa o (III) período médio (com duração de algumas horas): onde essa camada se rompe e a solução nos poros se torna saturada e a portlandita começa a precipitar, resultando no aumento da dissolução das fases de silicato de cálcio para a conservação do equilíbrio químico. Sendo que, os principais componentes do cimento Portland são, C_3S e C_2S , os quais reagem com a água para formar C-S-H e CH. Os aluminatos reagem nesse período formando etringita que é

² C_3S = silicato tricálcico ($3CaO.SiO_2$); C_2S = silicato dicálcico ($2CaO.SiO_2$); C_3A = aluminato tricálcico ($3CaO.Al_2O_3$) e C_4AF = ferro aluminato tetracálcico ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$).

convertida em monossulfoaluminato de cálcio (AFm). Por fim, o (IV) período tardio (duração de dias a anos): os produtos de hidratação formam uma camada densa em torno das partículas iniciais, que agem como uma barreira para a difusão de íons, diminuindo a taxa de reação. Assim, o processo torna a hidratação controlada pela velocidade de difusão dos íons através da camada de hidratos, de modo que a taxa de liberação de calor diminui (SCRIVENER, JULIAND e MONTEIRO, 2015).

O grau de hidratação final é alcançado quando ocorre o completo esgotamento do cimento, completo esgotamento da água de mistura juntamente com a eliminação da porosidade capilar. Quando a água de cura adicional não é fornecida a partir de uma fonte externa ou interna, parte da porosidade inicial cheia de água permanecerá como poros vazios, devido à retração química e a auto-dessecação que acompanham as reações de hidratação do cimento (WYRZYKOWSKI e LURA, 2016).

A taxa da hidratação do cimento diminui com a redução da umidade relativa (UR) e a hidratação, praticamente, cessa abaixo de 80 % de UR. O mecanismo dominante para impedir a hidratação com baixa UR está relacionado com a desaturação dos poros, uma vez que, produtos de hidratação não se formam na ausência de água (WYRZYKOWSKI e LURA, 2016).

O desenvolvimento da resistência ao longo do tempo é diretamente proporcional ao volume de produtos de hidratação produzidos por volume unitário da água de mistura, também equivalente à fração da porosidade inicial que foi preenchida por produtos de hidratação sólida (AITCIN, 2016a). Para Lootens e Bentz (2016) a porosidade é o parâmetro de resistência mais importante.

Com o grau crescente da hidratação, a água capilar é parcialmente utilizada e a quantidade de água gel aumenta. Devido à grande quantidade de água capilar não ligada, a umidade relativa nos poros da pasta de cimento será de 100 % após a hidratação completa do cimento (JENSEN, 2007). Bem como, com o aumento da hidratação aumenta a retração química pela formação dos produtos hidratados que ocupam um volume menor que a água e o grão anidro, assim como reduz o volume de água livre (água capilar). À medida que a hidratação prossegue, o cimento reage com a água e forma géis sólidos (o gel sólido ocupa menos espaço do que o cimento e à água a partir da qual é formado), sendo na superfície desses géis sólidos ligada por forças de adsorção à chamada água gel (água ligada quimicamente) (JENSEN, 2007). A água gel é quimicamente necessária para formar o C-S-H e os poros de gel provavelmente se formam como vazios nanométricos cheios de água isolados entre as folhas de C-S-H. (GARTNER, MARUYAMA e CHEN, 2017).

Os teores de água gel, gel sólido, água capilar, retração química, porosidade e teor de cimento anidro, ou seja, a distribuição de fases da hidratação pode ser calculada com base no modelo de Power (HANSEN, 1986), que permite cálculos quantitativos da composição volumétrica de materiais cimentícios (Equação 1 a Equação 6).

$$V_{rq} = \rho_c \times 6,4 \times 10^{-5} \times (1 - p) \times \alpha \quad \text{Equação 1}$$

$$V_{ac} = p - \left(\frac{\rho_c}{\rho_w}\right) \times (0,19 + 0,23) \times (1 - p) \times \alpha \quad \text{Equação 2}$$

$$V_{ag} = \left(\frac{\rho_c}{\rho_w}\right) \times 0,19 \times (1 - p) \times \alpha \quad \text{Equação 3}$$

$$V_{gs} = (1 - \rho_c \times 6,4 \times 10^{-5} + \left(\frac{\rho_c}{\rho_w}\right) \times 0,23) \times (1 - p) \times \alpha \quad \text{Equação 4}$$

$$V_{ca} = (1 - p) \times (1 - \alpha) \quad \text{Equação 5}$$

$$p = \frac{(a/c)}{(a/c) + (\rho_w/\rho_c)} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

V_{ag} = volume relativo da água gel (m^3/m^3 da pasta de cimento);

V_{gs} = volume relativo de gel sólido (m^3/m^3 da pasta de cimento);

V_{rq} = volume relativo da retração química (m^3/m^3 da pasta);

V_{ac} = volume relativo da água capilar (m^3/m^3 da pasta);

V_{ca} = volume relativo de cimento anidro (m^3/m^3 da pasta);

ρ_c = massa específica do cimento (kg/m^3);

p = porosidade inicial;

α = grau de hidratação (kg cimento reagido/ kg cimento inicial);

ρ_w = massa específica da água (kg/m^3);

a/c = relação água/ cimento (kg/kg).

A pasta de cimento endurecida, formada durante o processo de hidratação, é altamente porosa, com uma distribuição de tamanho de poro variando de nanômetros a milímetros. A porosidade da pasta de cimento pode ser dividida em dois componentes, a porosidade entre partículas, que é muitas vezes referida como porosidade capilar, e a porosidade do gel. A porosidade entre partículas representa o volume que existe originalmente entre os grãos de cimento anidro, cujas partes são gradualmente preenchidas com os produtos de hidratação, o gel C-S-H e

a portlandita. A porosidade do gel representa os poros que existem dentro do gel de C-S-H. A porosidade do gel inclui poros com vários tamanhos e geralmente tem a dimensão característica de 5,6 nm (ULM *et al.*, 2004; AÏTCIN, 2016a).

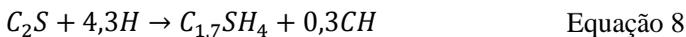
2.1.2 Silicato de cálcio hidratado

O C-S-H desempenha um papel dominante na determinação das propriedades mecânicas, físicas e químicas do material cimentício. De acordo com Taylor (1997), são identificados quatro diferentes tipos de C-S-H: Tipo I: proeminente em estágios iniciais da hidratação e consiste de fibras que crescem até 2 μm de extensão, muitas vezes chamado de gel de tobermorita; Tipo II: é geralmente, também, um produto da hidratação inicial descrito como favos de mel ou redes reticulares, muitas vezes chamado de jenita; Tipo III e IV: ambos são volumosos e aparecem apenas em pastas com mais de 28 dias de hidratação.

O C-S-H é o principal contribuinte para as propriedades do produto endurecido final, definindo permeabilidade, difusividade e estabilidade termodinâmica. A maior parte do C-S-H é formado apenas após o período dormente. Já a formação de C-H e etringita começam dentro de minutos de adição de água no cimento (OJOVAN e LEE, 2014).

À medida que a hidratação prossegue, os íons de silicato polimerizam-se para formar cadeias de forma polimérica superior. A polimerização corresponde ao endurecimento e à cura da pasta. Basicamente, os dois silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) que constituem cerca de três quartos de cimento Portland, em massa, reagem com água para produzir novos compostos: CH e C-S-H (OJOVAN e LEE, 2014). Ambas as fases de silicato de cálcio reagem essencialmente da mesma maneira com a água (TAYLOR, 1997; JENNINGS, 2008; GARTNER, MARUYAMA e CHEN, 2017):

As reações descritas ocorrem através de processos de dissolução-precipitação (Equação 7 e Equação 8). Existem muitas formas sutilmente diferentes de C-S-H, implicando que a sua estabilidade deve ser influenciada pela sua nano ou meso estrutura (BULLARD *et al.*, 2011).



Para a precipitação do C-S-H, um requisito mínimo necessário é o excesso de água, pois o C_3S só se hidratará completamente, se houver água suficiente para formar a portlandita e o C-S-H (JENNINGS, 2008). Porém, grande parte dessa água aparentemente está fracamente ligada à estrutura, quer por adsorção superficial, quer "preso" em poros muito pequenos de "gel" que são, no entanto, um recurso estrutural inerente. O teor de água na preparação do C-S-H é geralmente dividido em duas: água quimicamente ligada, a qual requer significativo calor para ser removida; e a água evaporável, ou fisicamente ligada, a qual é removida mais facilmente. Também, é considerada que certa quantidade mínima de água não evaporável está presente como água inter-camada fortemente ligada entre as folhas do tipo tobermorita, porém a água inter-camada faz parte da estrutura e não participa no processo de hidratação (JENNINGS, 2008).

De acordo com Gartner, Maruyama e Chen (2017) o C-S-H pode crescer rapidamente pela incorporação de cátions de cálcio altamente hidratados a partir da solução, embora este produto inicial seja metaestável pode reorganizar-se rapidamente em uma forma mais estável através de pontes de Si-O-Ca-O-Si, bem como de um tipo de tobermorita mais estável contendo mais grupos de silicato, proporcionando um comprimento de cadeia de silicato maior.

2.2 FIXAÇÃO DE CONTAMINANTES NAS ESTRUTURAS DOS POROS

A sorção³ é um método eficaz e econômico para o tratamento de águas residuais de metais pesados. Especialmente, quando os sorventes têm altas capacidades e velocidades de sorção, sendo considerada uma das tecnologias mais promissoras devido à sua configuração simples e econômica e operação fácil (RASHED, 2013).

A utilização de sorventes químico pode ajudar a reduzir as taxas de lixiviação de contaminantes quando solidificados. O objetivo da sorção química é proporcionar um agente que promova a adsorção/ absorção do contaminante para a fase sólida. Sob este sistema, o sorvente com o contaminante adsorvido pode ser incorporado em uma matriz de cimento, em vez de ser retido como líquido nos espaços vazios na matriz cimentícia. Alguns materiais podem ser classificados como sorventes químicos, tais como resinas, argilas e zeólitas (PHILLIPS, 1981; MYERS *et al.*, 1985).

³ Sorção refere-se à ação de absorver e adsorver.

Segundo Hunce *et al.* (2012) a razão da utilização do agregado leve, como o zeólita, no processo de S/E é para se beneficiar da propriedade de absorção do material.

A sorção depende das condições experimentais tais como pH, concentração do metal e tamanho da partícula (BAILEY *et al.*, 1999). Para ser considerado um sorvente eficaz, o material deve apresentar boa capacidade de adsorção, absorção e troca iônica. Sendo que, a capacidade de adsorção varia com a porosidade, tamanho das partículas e área superficial. Já, a capacidade de troca iônica depende de fatores como, estrutura e carga iônica (BAILEY *et al.*, 1999; WANG e PENG, 2010).

Os agregados reciclados, oriundos de concretos, podem ser utilizados como sorventes químicos, devido as matrizes da pasta de cimento endurecida presentes na fração fina (< 2 mm) que podem efetuar a sorção de espécies de metais pesados no estado líquido (COLEMAN, LEE e SLIPPER, 2005). Bem como, o pH alcalino e a alta capacidade de neutralização ácida da pasta de cimento podem auxiliar para a imobilização de metais pesados (DAMRONGSIRI, 2017).

Coleman, Lee e Slipper (2005) observaram polígonos de metais pesados ricos em cálcio sobre a superfície de cada uma das amostras de agregado de concreto britado saturado com metal e concluíram que são cristais de Portlandita reprecipitados, distorcido da sua morfologia hexagonal normal devido à inclusão de íons de Cu^{2+} , Zn^{2+} e Pb^{2+} .

Os autores estudaram a eliminação do cobre, zinco e chumbo pelo agregado de resíduo de concreto britado (< 2 mm). Para isso, colocaram 2,5 gramas de concreto britado e 100 ml de uma solução de nitrato de metal (concentração de 1000 ppm) em uma garrafa de polipropileno e mantiveram a uma temperatura de 20 °C por 3, 6, 24, 48, 72 e 120 horas. Esse procedimento foi realizado para cada metal, para verificar o tempo de equilíbrio para remoção do mesmo. Passado o tempo de contato, os líquidos sobrenadantes foram recuperados e os agregados submetidos ao ensaio de lixiviação com água destilada (norma DIN 38414). Os resultados indicaram que o tempo de equilíbrio para a remoção do Cu^{2+} e Zn^{2+} pode não ter sido estabelecido nesse tempo. Por outro lado, o tempo de equilíbrio para a remoção de Pb^{2+} , a partir da solução, foi alcançado dentro de 48 horas. O tempo de equilíbrio para a remoção do Pb^{2+} pelo concreto britado foi relativamente rápido e o aumento do pH (11,9 enquanto que o pH do Cu foi 11,3 e do Zn 10,8) da solução sugerem que os mecanismos de remoção dos metais são diferentes. O Zn^{2+} e Cu^{2+} foram removidos por precipitação na superfície, enquanto que o mecanismo de interação de Pb^{2+} com o agregado de concreto foi via difusão na matriz de cimento. O mecanismo de absorção/ adsorção de

zincu pelo agregado de concreto foi caracterizado através de três fases: a deposição inicial de um precipitado rico em zinco sobre a superfície do agregado de concreto a alguns micrometros de profundidade, a formação de um segundo depósito de cerca de 10 μm e um precipitado superficial final (COLEMAN, LEE e SLIPPER, 2005).

Em torno de 99 % do Cu^{2+} e do Zn^{2+} e 90 % do Pb^{2+} presentes na solução inicial foram removidos durante o contato com o agregado de concreto, embora apenas 53 % do Cu^{2+} e 79 % Zn^{2+} e do Pb^{2+} foram ligados ao agregado e o restante foi precipitado. Em relação à lixiviação, as concentrações acumuladas de íons de metais pesados lixiviados do concreto britado indicam que relativamente pouco (< 2 %) das espécies metálicas ligadas foram facilmente solúveis, para os três metais analisados (COLEMAN, LEE e SLIPPER, 2005).

Por outro lado, a utilização de agregados reciclados como sorvente químico no processo de solidificação/ estabilização em matriz cimentícia ainda não foi testado. Percebe-se que a utilização de sorventes químicos é uma alternativa para a melhora da eficiência do processo de solidificação/ estabilização, com possibilidade efetiva da retenção/ fixação do metal pesado no interior do agregado.

2.3 CRITÉRIOS TECNOLÓGICOS PARA VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO PROCESSO SOLIDIFICAÇÃO/ ESTABILIZAÇÃO COM CIMENTO PORTLAND

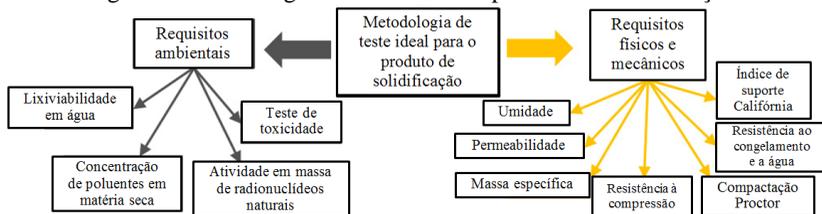
No processo de solidificação e estabilização dos metais pesados em matrizes cimentícias, o termo desempenho é utilizado para descrever a capacidade do material tratado em manter a sua função de minimizar a liberação de contaminantes para o meio ambiente e apresentar a resistência à compressão mínima exigida (REYES *et al.*, 2011).

Hodul, Dohnálková e Drochytka (2015) criaram uma metodologia de teste para o produto de solidificação (Figura 1). O teste proposto resulta principalmente dos requisitos decorrentes dos seguintes manuais técnicos: Lei de Resíduo nº 185/ 2001, Diretriz da República Tcheca nº 163/ 2002 e Diretiva do Parlamento Europeu nº 98/2008/ES.

Para determinar a eficiência, a estabilidade e os mecanismos envolvidos no processo de S/E devem ser analisados os fenômenos físicos, fenômenos químicos e a microestrutura. Para isso deve-se analisar o produto final perante as propriedades mecânicas (resistência à compressão e à flexão), propriedades físicas (massa específica, permeabilidade e porosidade) e propriedades físico-químicas (solubilização e lixiviação). Como também, difratometria de raios-X (DRX), espectroscopia de ener-

gia dispersiva (EDX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ressonância magnética nuclear (RMN), por serem eficazes em revelar a química da solidificação. Mas, avaliar o processo S/E com utilização de apenas um processo de caracterização apresenta limitações por, geralmente, não delinear sistemas heterogêneos complexos, desse modo é necessário um conjunto de técnicas para a caracterização (LIN, CHEN e LIN, 1997).

Figura 1: Metodologia de teste ideal do produto de solidificação.



FONTE: Adaptado de Hodul, Dohnálková e Drochytka, 2015.

Segundo Stegemann e Côté (1996) existem três níveis de ensaios para avaliar o processo de solidificação/ estabilização:

a) Nível 0 refere-se às propriedades de massa do resíduo, porosidade e composição da matriz solidificada, por meio dos ensaios de massa específica, teor de umidade, porosidade da matriz, devendo também determinar a concentração dos metais pesados. Esses dados são importantes antes de iniciar a avaliação crítica do material solidificado, uma vez que podem afetar a permeabilidade e a lixiviabilidade do material;

b) Nível 1 está relacionado às propriedades físico-químicas, analisadas através dos ensaios de lixiviação e capacidade de neutralização ácida. Esses critérios são definidos com base em critérios regulamentares existentes para a água potável e a classificação dos resíduos;

c) Nível 2 estão às propriedades referentes à durabilidade e resistência mecânica, verificadas por meio de ensaios de resistência à compressão, permeabilidade e imersão-secagem. Resistência à compressão (antes e após a imersão) proporciona uma medida de durabilidade física, enquanto que a resistência ao desgaste pode ser medida sujeitando a amostra a sucessivos ciclos de imersão-secagem. Esses ensaios são realizados para determinar a durabilidade da matriz em longo prazo.

Na Tabela 1 estão dispostos os principais ensaios e desempenho esperado para o material tratado pelo processo de S/E e se o material final poderá ser utilizado ou apenas descartado em aterro sanitário, de acordo com o Protocolo do Canadá (WTC, 1991).

Tabela 1: Principais ensaios e desempenho esperado pelo processo de S/E.

Ensaio	Utilização		Disposição em aterro sanitário
	Sem restrição	Controlada	
Concentração do lixiviado ¹	LQA/100	LQA/20	LQA
Capacidade de neutralização ácida	N/A	>1 (para pH 9)	>3 (para pH 9)
Mobilidade do contaminante na matriz (-log[D _e])	N/A	>9 m ² /s	>8 m ² /s
Umidificação/ secagem	N/A	Após 12 ciclos perda de peso < 10%	Após 12 ciclos perda de peso <10%
Permeabilidade	N/A	<10 ⁻⁷ cm/s	<10 ⁻⁶ cm/s
Resistência à compressão	N/A	0,35 MPa	3,5 MPa

Nota: ¹ Ensaio TCLP; LQA = limite de qualidade da água; N/A = não aplicável.

FONTE: Adaptado de Stegemann e Côté, 1996.

Brito (2007) sugere um protocolo de avaliação do produto tratado pelo processo de S/E para ser utilizado no Brasil, no qual determina que para o material tratado ser considerável aceitável, deve apresentar resistência à compressão superior a 1 MPa, absorção de água inferior a 40 %, umidificação/ secagem (6 ciclos) perda inferior a 15 % do peso inicial e os limites máximos permissíveis para lixiviação do cromo total, chumbo e zinco são, respectivamente, 100, 20 e 100 mg/kg e para solubilização são 0,2 mg/kg (cromo total), 0,02 mg/kg (chumbo) e 20 mg/kg (zinco).

Os requisitos mínimos esperados para o produto do processo de S/E são: capacidade de lixiviação mínima dos contaminantes, resistência máxima e durabilidade em longo prazo (HODUL, DOHNÁLKOVÁ e DROCHYTKA, 2015).

Assim, para determinar se o processo de S/E foi eficiente o material tratado deve ser avaliado perante várias características, como citado acima e melhor explanado nos itens seguintes, para depois ser determinado o seu destino final.

2.3.1 Resistência mecânica

A resistência do material representa a capacidade da estrutura do material para resistir à aplicação de um esforço físico sem incorrer em deformação que conduza a uma falha estrutural.

Os materiais solidificados geralmente são fracos e porosos, apresentando resistência à compressão inferior a 1 Mpa. De acordo com o Protocolo do Canadá (WTC, 1991) o valor de resistência à compressão

mínima necessária para a viabilidade do processo de S/E é de 0,35 MPa. Nos Estados Unidos o EPA (2001) considera o mesmo valor, entretanto esse é o critério para descarte do material em aterro sanitário. Já, a agência ambiental da Europa (2010) determina que os resíduos monolíticos para serem aceitos em aterros devem apresentar aos 28 dias de cura 1 Mpa à compressão. Sendo o requisito mais exigente da ASTM C-90 (2012), para utilização em blocos de concreto (13 MPa).

Na Tabela 2 têm-se um resumo dos valores da resistência à compressão mínima exigida por cada país para a aceitação do processo de solidificação/ estabilização e seu respectivo tempo de cura para a realização do ensaio com o material tratado.

Tabela 2: Resistências à compressão mínima dos corpos de prova exigida por cada país para aceitar o processo de S/E.

País ou norma	Ano	Resistência à compressão (MPa)	Idade do ensaio (dias)	Dimensão do corpo de prova (cm)	Volume (cm³)
Protocolo do Canadá	1991	0,35	56	5 x 5 x 5	125,0
EUA - EPA	2001	0,35	28	5 x 10	196,3
Brasil – Brito*	2007	1,00	28	5 x 10	196,3
Agência ambiental da Europa	2010	1,00	28	4 x 4 x 16	256,0
Itália	2005	2,94	28	4 x 4 x 8	128,0
ASTM C-90	2012	13,00	28	4 x 4 x 16	256,0

NOTA: Brito (2007) sugere um protocolo para avaliação do material tratado pelo processo de S/E.

A resistência à compressão é tipicamente monitorada como parâmetro de desempenho do processo de S/E para garantir que ocorreu a reação química do aglomerante com a água. Sendo um indicador indireto da durabilidade. Portanto, a resistência pode ser utilizada como referência durante estudos do processo de S/E para a escolha do tratamento apropriado, como tipos de cimento ou aditivos, para maximizar a durabilidade, assim como monitorar o desempenho durante a aplicação do processo de S/E (REYES *et al.*, 2011).

A resistência à compressão depende da qualidade da estrutura dos poros dos materiais cimentícios. Esta qualidade é dependente do tipo e da quantidade dos componentes que formam a estrutura do poro, como produtos de hidratação do cimento e seus produtos de reação com as misturas (ZIVICA, 1997).

De acordo com Reyes *et al.* (2011) deve ser levado em conta à duração e a qualidade das condições de cura, uma vez que a resistência do material tende a aumentar com o tempo de cura, assim como reduzir a porosidade e a permeabilidade da matriz.

A resistência mecânica é uma propriedade importante para os materiais solidificados, uma vez que, se o produto de S/E não atingir uma resistência mínima (como citado na Tabela 2) é um indicativo que a microestrutura do material está muito porosa e com baixo grau de hidratação, o que pode resultar em maior lixiviação dos contaminantes.

2.3.2 Coeficiente de permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade é definido como a facilidade que um fluido passa através de um meio poroso (REYES *et al.*, 2011). De acordo com a NBR 10786 (2013), o coeficiente de permeabilidade à água expressa a velocidade de percolação da água no concreto, definido a partir da Lei de Darcy, aplicável a fluxos de fluido viscoso em meio poroso, em regime laminar e permanente com a vazão de água em uma direção, submetido a um gradiente de pressão que atravessa uma seção do material cimentício.

No Brasil ainda não há normativas para avaliar o produto do processo de solidificação/ estabilização. Já, nos Estados Unidos, a norma ASTM D 5084 (2010) estipula que o material final tratado com o processo de S/E deve apresentar coeficiente de permeabilidade menor que 1×10^{-6} cm/s. O Protocolo do Canadá (1991) determina que para a utilização controlada do material final deve apresentar coeficiente de permeabilidade inferior a 1×10^{-7} cm/s e para a disposição em aterro sanitário o coeficiente deve ser inferior a 1×10^{-6} cm/s.

A permeabilidade do material cimentício depende do tamanho, distribuição e continuidade dos poros da pasta, do índice de vazios, da permeabilidade dos agregados, da zona de transição pasta/agregado, da idade (reduz a permeabilidade com o tempo de hidratação) e cura do material (a falta de cura adequada provoca a interrupção parcial ou total da hidratação do cimento, aumentando a permeabilidade e porosidade).

Os materiais cimentícios, por sua própria constituição, são materiais porosos, uma vez que, geralmente, é utilizado um volume de água superior ao necessário para hidratar o cimento e o excesso de água ao evaporar deixa poros vazios. Deve-se considerar também o ar incorporado a massa durante a mistura. À medida que reduz a relação a/c, são obtidas estruturas cada vez mais compactas, com poros capilares mais “estritos”. Assim, reduz a absorção total e a permeabilidade, devido à

redução significativa da porosidade capilar e da comunicação entre os poros.

2.3.3 Lixiviação

A caracterização da lixiviação é a forma mais relevante para avaliar as propriedades ambientais dos materiais de construção que ficarão em contato direto ou indireto com o solo e águas subterrâneas. A lixiviação é o processo pelo qual os constituintes de um material sólido (como solo, resíduos, materiais de construção, entre outros) são liberados no ambiente através do contato com a água, sendo governada principalmente pelo mecanismo de difusão.

A difusão é considerada como o mecanismo que controla a liberação dos contaminantes a partir dos materiais solidificados à base de cimento (MOON, 2005). O ensaio de lixiviação é um ensaio acelerado da estabilidade do resíduo, sendo geralmente agressivo para tentar compensar o curto período de duração, é amplamente utilizado como indicador do desempenho da matriz. No entanto, os dados do ensaio de lixiviação sobre os componentes de cimento não permitem, normalmente, uma distinção entre os mecanismos físicos e químicos (GLASSER, 1997).

A determinação do potencial de lixiviação dos contaminantes a partir de materiais à base de cimento (pasta, argamassa ou concreto), ou sólidos porosos, é importante para determinar o comportamento de lixiviação de tais materiais (como a cinética de lixiviação, taxas de lixiviação, comportamento de lixiviação do material em longo prazo e os mecanismos envolvidos com a liberação dos contaminantes) (YANG *et al.*, 2011; LAMPRIIS *et al.*, 2011; REYES *et al.*, 2011), além de determinar a eficiência do processo de solidificação/ estabilização (pelo potencial risco ambiental do material).

Os fatores que influenciam a lixiviação de metais em materiais cimentícios são a dimensão da partícula do agregado, a temperatura, a relação líquido/sólido, o pH, a distribuição do tamanho dos poros, entre outros (VAN DER SLOOT, 1998). De acordo com Hekal *et al.* (2011), a taxa de lixiviação é fortemente dependente da concentração e da solubilidade dos contaminantes, sobretudo da permeabilidade da matriz de cimento.

As reações químicas entre os metais pesados e os compostos de cimento, para Malviya e Chaudhary (2006) e Reyes *et al.* (2011), podem resultar em compostos estáveis, evitando assim, a sua lixiviação da matriz inorgânica.

Na Tabela 3 têm-se os principais ensaios de lixiviação realizados no material monolítico e no material granular (são os fragmentos do material monolítico, com dimensão inferior a 9,5 mm).

Tabela 3: Ensaios de lixiviação realizados no material granular e monolítico.

MATERIAL GRANULAR					
Ensaio	Norma	L/S	Meio de lixiviação (pH)	Nº de extrações	Tempo das extrações
Solubilização	NBR 10006	4	Água ^a (pH = 7)	1	7 dias
Conformidade	EN 12457-4	10	Água ^a (5 < pH < 7,5)	1	24 horas
Lixiviação	NBR 10005	20	Ácido acético (pH ≈ 5 e 3)	1	18 horas
SPLP ^b	SW846 Método 1312	20	Ácido sulfúrico/ nítrico (pH ≈ 4,2 e 5)	1	18 horas
MATERIAL MONOLÍTICO					
Ensaio	Norma	L/S	pH	Nº de extrações	Tempo das extrações
Tanque	EA NEN 7375	5	Água ^a (pH = 7)	8	Variando de 6 horas a 64 dias
Em coluna	ASTM D 4874	-	Água ^a (pH = 7)	1	Variável
Semi-dinâmico	ANS 16.1	V _L /S ^c = 10cm	Água ^a (pH = 7)	10	12 horas
Lixiviação	AFNOR X 31-211	10	Água ^a (pH = 7)	1	24 horas

Nota: L/S: relação líquido/ sólido; ^a Água destilada e deionizada; ^b SPLP: Synthetic precipitation leaching procedure; ^c V_L/S: volume lixiviado pela área da amostra.

Após o ensaio de lixiviação no material monolítico, pode-se calcular o coeficiente de difusão efetiva (D_e) que é um indicador da taxa de mobilidade do contaminante, de acordo com a Equação 9, que pode ser encontrada na norma EA NEN 7375 (2004). Geralmente a difusão efetiva varia de 10^{-9} m²/s (altamente móvel) a 10^{-19} m²/s (imobilizado). Sendo que a difusão é um fenômeno de transporte de massa a nível molecular, impulsionado pela ocorrência de um gradiente de concentração entre dois meios (CALLISTER, 2007).

$$D_e = \left(\frac{\varepsilon_{64}}{2653 \times \rho \times U} \right)^2 \times f \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

D_e = média do coeficiente de difusão efetiva (m^2/s);

ε_{64} = lixiviação cumulativa derivada do contaminante, 64 dias (mg/m^2);

ρ = densidade da amostra (kg de matéria seca por m^3);

U = quantidade do contaminante disponível (mg/kg material seco);

f = fator de conversão igual a $1 s^{-1}$.

O coeficiente de difusão efetiva sob a forma de logaritmo negativo ($-\log D_e$) indica a taxa de lixiviação, sendo que quanto maior for o valor para a taxa de lixiviação, menor será a velocidade de lixiviação do contaminante em questão:

$-\log D_e > 12,5$ = contaminante com baixa mobilidade;

$11,0 < -\log D_e < 12,5$ = contaminante com mobilidade média;

$-\log D_e < 11,0$ = contaminante com alta mobilidade.

De acordo com Bentz (2009) argamassas com agregado leve (xisto expandido como agente de cura) reduziram o coeficiente de difusão, em torno de 55 a 75 %, em comparação a argamassa de referência. Devido à redução significativa da zona de transição interfacial.

Assim, ensaios de lixiviação à base de fluxo são considerados mais adequados para materiais monolíticos, pois esses ensaios captam a liberação do contaminante dependente do tempo, como é o caso do ensaio de tanque (REYES *et al.*, 2011).

Para a NBR 10004 (2004) a concentração máxima no extrato obtido no ensaio de lixiviação (NBR 10005) para o cromo é de 5,0 mg/L e para o chumbo é 1,0 mg/L. No ensaio de solubilização os valores máximos permitidos são 0,01 mg/L, 0,05 mg/L e 5,00 mg/L, respectivamente para o chumbo, o cromo e o zinco.

A quantidade de metal lixiviado é amplamente influenciado pela concentração total do contaminante e pelo pH do meio circundante, pode ser considerado como um fator de retenção química, que inclui todas as interações físico-químicas entre o contaminante e, em particular, a matriz sólida, tais como reações de precipitação/ dissolução, adsorção e troca iônica (DELL'ORSO *et al.*, 2012).

2.3.4 Ressonância magnética nuclear

A espectroscopia de ressonância magnética nuclear (RMN) é o estudo da interação entre a radiação eletromagnética e a matéria. A análise espectral na qual se baseia, permite detectar a absorção e emissão de radiação eletromagnética em determinadas frequências e relacioná-las

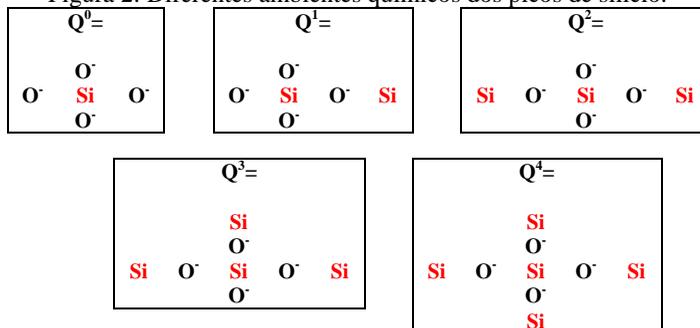
com os níveis de energia envolvidos. Estas são as medidas processadas que são interpretadas em informações úteis sobre a estrutura.

Com a análise de RMN pode-se obter informações sobre as fases anidras e hidratadas do cimento, bem como a presença ou ausência de alguma fase e o grau de polimerização dos silicatos tetraédricos. Como também, permite estabelecer relações entre a estrutura formada do silicato de cálcio hidratado e o comportamento durável e mecânico dos materiais cimentícios (JIMÉNEZ e PALOMO, 2010).

A hidratação do silicato do cimento é um processo de condensação do monômero SiO_4^{-4} (Q^0), a silicatos poliméricos (Q^n), sendo que “n” indica o grau de ligação destas unidades ($n= 1, 2, 3$ e 4) (ENGELHARDT, 1989). Ou seja, a presença da unidade Q^0 refere-se ao cimento anidro, enquanto que as unidades Q^1 a Q^4 referem-se ao gel de C-S-H e outros produtos de hidratação. Os cinco entornos do Si são (Figura 2):

- Q^0 = um átomo de silício rodeado por 4 átomos de oxigênio, ou seja, um monômero ortossilicato (SiO_4^{-4});
- Q^1 = um dissilicato e grupo terminal de cadeia ($(\text{SiOSi})\text{O}_3^{-3}$), ou seja, unido unicamente a outro tetraedro;
- Q^2 = um silicato que alonga a cadeia, rodeado por 2 tetraedros adjacentes ($\text{Si}(\text{OSi})_2\text{O}_2^{-2}$), ou seja um grupo de meia cadeia;
- Q^3 = um silicato ramificado de cadeia unido a 3 tetraedros ($\text{Si}(\text{OSi})_3\text{O}^{-1}$);
- Q^4 = silicato com ligações cruzadas em uma rede tridimensional unidos a 4 tetraedros de silício ($\text{Si}(\text{OSi})_4$) (ENGELHARDT, 1989).

Figura 2: Diferentes ambientes químicos dos picos de silício.



FONTE: Adaptado de Engelhardt, 1989; Jiménez e Palomo, 2010.

Na Tabela 4 têm-se as faixas dos deslocamentos químicos de ^{29}Si no estado sólido, classificados de acordo com o grau de condensação dos silicatos tetraédricos (polimerização).

Tabela 4: Deslocamentos químicos.

Símbolo	Tipo	Faixa (ppm)
Q ⁰	Monossilicatos	-68 a -76
Q ¹	Dissilicatos e grupo terminal de cadeia	-76 a -82
Q ²	Grupo de meia cadeia	-82 a -92
Q ³	Locais de ramificações de cadeia	-92 a -102
Q ⁴	Estrutura tridimensional	-102 a -129

FONTE: Wilker *et al.*, 1982; Engelhardt, 1989.

Com os espectros de RMN pode ser calculado o grau de hidratação do clínquer, em termos de porcentagens, de acordo com a Equação 10 (JUSTNES *et al.*, 1990; LIN *et al.*, 1996):

$$\alpha = 100 - \left(\left[\frac{I(Q^0)}{I^0(Q^0)} \right] \times 100 \right) \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

α = grau da hidratação do clínquer de cimento (C₂S e C₃S);

$I(Q^0)$ = valor da integral no pico Q⁰;

$I^0(Q^0)$ = valor do somatório das integrais de todos os picos.

Além disso, Justnes *et al.* (1990) também definiram como determinar o comprimento médio da cadeia ou o número de tetraedros de SiO₄ no gel de C-S-H (MCL), de acordo com a Equação 11:

$$MCL = 2 \times \left[\frac{I(Q^1) + I(Q^2)}{I(Q^1)} \right] \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

MCL = comprimento médio da cadeia;

$I(Q^1)$ = valor da integral no pico Q¹;

$I(Q^2)$ = valor da integral no pico Q².

Quando o cimento é hidratado com água forma gel de C-S-H como principal produto de reação. A formação desse composto causa importantes mudanças nos espectros de ²⁹Si RMN/MAS (ressonância magnética nuclear/ ângulo mágico de rotação), estas mudanças são apenas consequência do progresso da hidratação e são caracterizadas pela diminuição do sinal associada ao material que ainda permanece anidro, unidades Q⁰, e a aparição de dois novos sinais para -79 e -85 ppm, cuja intensidade aumenta com o tempo de hidratação, e se associa a formação de unidades Q¹ e Q² respectivamente (JIMÉNEZ e PALOMO, 2010).

Os resultados do espectro de ^{29}Si RMN podem ser resumidos de acordo com a hidratação: se o cimento Portland, produz inicialmente um C-S-H não cristalino contendo principalmente silicato dimérico, o pico dominante é o Q^1 . Alguns Q^0 estão presentes desde os estágios iniciais. O desenvolvimento de Q^2 indica um crescimento no comprimento médio da cadeia, ocorre numa fase posterior da hidratação e no envelhecimento do gel. Cadeias mais longas são encontradas em géis de C-S-H de menor relação Ca/Si, produzido, por exemplo, por hidratação de C_3S com adições de SiO_2 . Picos Q^3 e Q^4 geralmente não são observados, exceto em pastas contendo adições de SiO_2 (PARRY-JONES *et al.*, 1989 e BROUGH *et al.*, 1994).

2.4 SÍNTESE

Nesse capítulo foi relatado sobre o processo de solidificação/ estabilização dos metais pesados, como eles afetam o cimento Portland e os principais critérios e métodos para verificar a eficiência do processo.

Os metais pesados são materiais perigosos para a saúde humana e para o meio ambiente, por isso devem ter uma destinação correta. O processo de solidificação/ estabilização é o mais importante, reconhecido e eficiente método para encapsular o metal pesado, evitando assim, a troca de fluídos e íons do material cimentício com o meio exposto.

A solidificação é o processo de encapsular em matriz sólida o metal pesado, não envolvendo necessariamente reação química. A estabilização é a transformação do metal pesado em uma forma menos solúvel, tóxica e móvel, por precipitação, sorção ou substituição. O processo de solidificação/ estabilização fixa os metais pesados por sorção, incorporação na estrutura e precipitação durante a hidratação do cimento.

Antes da destinação final do material tratado pelo processo de solidificação/ estabilização, é necessária a realização de ensaios que comprovem a eficiência do processo, que deve ter baixa permeabilidade e porosidade, apresentar uma zona de transição interfacial densa, para assim obter bons resultados nos ensaios de resistência mecânica, lixiviação e coeficiente de permeabilidade, e por fim deve-se ater ao pH do meio que será exposto o material final.

As interações químicas entre o metal pesado e os compostos do cimento podem resultar na formação de compostos estáveis, entretanto o metal também pode afetar as reações de hidratação do cimento (retardando ou acelerando-as), alterando suas estruturas (cristalinidade e tamanho de partículas) e solubilidade. Sendo essas interações químicas e a

microestrutura do material solidificado que controlam a lixiviação do metal pesado da matriz.

A condição de hidratação nos primeiros dias é essencial para um bom funcionamento do processo de solidificação/ estabilização, por ser responsáveis pela qualidade do material no decorrer de sua vida útil.

No processo de solidificação/ estabilização pode ser utilizado o agregado leve como sorvente químico devido ao maior poder de absorção que o agregado normal, auxiliando na imobilização dos metais pesados, por incorporar em sua microestrutura o metal pesado e por auxiliar em uma zona de transição interfacial mais densa e com menos espaços vazios na matriz cimentícia.

3 AGREGADOS LEVES COMO AGENTES DE CURA NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Historicamente o agregado leve era utilizado para reduzir a massa específica do concreto. Em 1957, ocorreu a primeira publicação reconhecendo o agregado leve como potencial para a cura interna (CI) em materiais cimentícios, onde Paul Klieger publicou que “os agregados leves absorvem considerável água da mistura que aparentemente pode ser transferida para a pasta durante a hidratação” (KLIEGER, p. A5-2, 1957). Já no século XXI, a cura interna surgiu como uma nova tecnologia, para a produção de concreto com maior resistência à fissuração nas primeiras idades e com maior durabilidade (BENTZ e WEISS, 2011).

Quando o cimento entra em contato com a água, ocorrem reações químicas e são criados poros capilares. À medida que a água nos poros capilares é consumida pela hidratação ou por dessecação atmosférica, ocorre a diminuição da umidade relativa e aumento das sollicitações internas. Já, os grãos do material leve, com elevada absorção e umedecidos previamente, podem disponibilizar água na estrutura porosa do cimento, com isso ocorre uma redução das tensões capilares. O processo de fornecimento de água adicional para a redução da tensão capilar dos poros e hidratação do cimento por meio dos agregados leves é chamado de cura interna (WEBER e REINHARDT, 1997).

Do ponto de vista teórico, quando a umidade relativa interna ao redor do agregado leve é menor que a umidade no interior do agregado leve, a água contida no agregado leve deve começar a fluir para fora para preencher os poros vazios no material cimentício e, conseqüentemente permitir o aumento da umidade interna (HAN *et al.*, 2014). A diferença na distribuição de tamanho de poros entre a matriz de cimento ($\varnothing < 100$ nm) e do agregado leve ($\varnothing > 1000$ nm) garante efetivamente o transporte de água de cura interna do agregado leve para a pasta de cimento, resultando em ampliar a duração do período com 100 % de umidade relativa interna e, portanto, reduzir a retração do material (HAN *et al.*, 2014).

A cura interna refere-se ao processo pelo qual a hidratação do cimento ocorre porque há disponibilidade de água interna adicional que não faz parte da água da mistura (ACI 308-213 R-13, 2013). Essa água adicional é fornecida, geralmente, utilizando agregados leves pré-saturados, polímeros superabsorventes, agregado de peso normal pré-saturado, agregado reciclado ou fibras de madeira saturada (RILEM TC-196, 2007; AÏTCIN, 2016).

O objetivo da cura interna é proporcionar reservatórios internos que abasteçam a hidratação da pasta de cimento com a água necessária para manter a saturação dentro dos poros capilares da pasta durante os primeiros dias ou semanas de hidratação. Essa disponibilidade de água é especialmente importante durante o primeiro dia de hidratação em concretos de alto desempenho, porque sem essa água, significativa retração autógena e fissuras podem ocorrer.

As condições de hidratação nas primeiras idades são as principais responsáveis pela qualidade do material no decorrer de sua vida útil. Nas primeiras idades o efeito térmico do calor de hidratação pode elevar a temperatura do concreto significativamente causando expansão e contração térmica, subsequente durante o resfriamento pode ocorrer o aparecimento de fissuras.

A cura interna ocorre por absorção de água do agregado leve antes do contato com a mistura do concreto, para assegurar uma trabalhabilidade adequada. Uma vez que, quando o agregado leve é adicionado na mistura seco previamente, o seu potencial de reservatório interno é reduzido, pois além de absorver parte da água da mistura pode também absorver grãos de cimento e/ou preencher seus poros com pasta de cimento, o que dificultaria a saturação e posterior liberação da água. Assim como, por esse agregado apresentar maior porosidade e menor massa específica, reduz a massa específica do material produzido (GOLIAS, CASTRO e WEISS, 2012; ACI 308-213 R-13, 2013).

A realização da cura interna é necessária, principalmente, quando a cura externa convencional não é eficaz ou de difícil acesso para realizá-la (BENTZ *et al.*, 2007). A água de cura externa não consegue penetrar em toda a área do material cimentício, penetrando apenas alguns milímetros na superfície da matriz. Já, a água fornecida pela cura interna possibilita uma distribuição da água mais igualitária e uniforme na pasta, uma vez que os agregados vão liberar essa água conforme a necessidade do material, para evitar a auto-dessecação e os problemas acarretados a isso, como as fissurações, maior permeabilidade e facilidade da entrada de substâncias deletérias (CASTRO *et al.*, 2010).

Assim, os três fatores principais que influenciam a eficácia da cura interna em uma mistura cimentícia são: a) o volume de água disponível para a cura interna; b) a capacidade da água para deixar o agregado leve quando necessário para a cura interna; e c) a distribuição do agregado leve dentro da matriz, de modo que fique espalhado por todo o concreto, para que a água da cura interna consiga migrar ao longo do material (HENKENSIEFKEN *et al.*, 2009).

Como vantagens da cura interna pode-se citar o aumento da hidratação, a redução da porosidade, permeabilidade e absorção de água, menor massa específica, redução da retração autógena, menor propensão para fissurar nas idades iniciais, maior durabilidade e aumento da resistência mecânica, bem como melhor hidratação do cimento, com uma zona de transição interfacial melhorada, de modo que a microestrutura será mais densa, homogênea e menos porosa, ou seja, a cura interna está diretamente relacionada com o encapsulamento físico dos metais pesados na matriz cimentícia (BENTZ, 2009; CASTRO, 2011; GOLIAS, CASTRO e WEISS, 2012; HE *et al.*, 2014; BOGAS, BRITO e FIGUEIREDO, 2015). Segundo Roberts (2004) os benefícios da cura interna são observados em idades precoces (em até dois dias), pois quando o agregado leve saturado é incorporado na mistura de concreto, disponibilizará a água absorvida imediatamente com o início da hidratação do cimento. Corroborando com He *et al.* (2014), aonde concluíram que a resistência mecânica do material cimentício com agregado leve se desenvolve mais rapidamente em fase inicial (até 14 dias). Após a hidratação, por quase 28 dias, o efeito de liberação de água do agregado leve desempenha um papel importante na cura interna, o que favorece a zona de transição interfacial entre os agregados e a pasta de cimento.

Já, as desvantagens são devido ao excesso de agregado leve no material cimentício, o que ocasionaria uma quantidade de água excessiva na matriz, reduzindo a resistência mecânica e aumentando a porosidade e a permeabilidade (GLASSER, 2011; GOLIAS, CASTRO e WEISS, 2012). Para Han *et al.*, (2014) outra desvantagem seria que a cura interna não consegue eliminar a retração da superfície em longo prazo sob o status de secagem da superfície, embora ela pode efetivamente reduzir a fissuração interna induzida pela retração autógena.

A quantidade de água adicionada para formar a mistura fresca é crucial para o desempenho subsequente da matriz de cimento no estado endurecido. Uma vez que, com pouca água a mistura não apresentará uma boa trabalhabilidade e fluidez, como também muitos grãos de cimento podem permanecer anidros. Por outro lado, o excesso de água resultará em uma mistura fluida, mas no estado endurecido apresentará um produto fraco, poroso e permeável. Assim, é necessário determinar uma relação a/c que satisfaça os critérios de: a) obtenção de valores satisfatórios para as propriedades iniciais, como fluidez da mistura, para permitir a colocação e compactação; b) propriedades desejáveis para as idades intermediárias, como evitar a segregação de agregados mais densos quando manipulados e reduzir o assentamento pela gravidade antes do endurecimento ocorrer e; c) propriedades de longa duração, como

resistência mecânica, permeabilidade e resistência à penetração de agentes agressivos (GLASSER, 2011).

Em 1999, Bentz e Snyder sugeriram a Equação 12 para calcular o consumo de agregado leve necessário para fornecer água de cura interna em determinada mistura cimentícia e para compensar a retração química.

$$M_{LWA} = \frac{Cf \times CS \times \alpha_{\max}}{S \times Abs} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

M_{ALV} = massa de agregado leve fino (seco, <4,8 mm) necessário por unidade de volume de concreto (kg/m^3);

Cf = teor de cimento para mistura de concreto (kg/m^3);

CS = retração química do cimento (gramas _{água} / gramas _{cimento});

α_{\max} = máximo esperado do grau de hidratação do cimento;

S = grau de saturação do agregado (0 a 1);

Abs = absorção do agregado leve ($\text{kg}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{agregado leve seco}}$).

A Equação 12 estima a quantidade de água na cura interna necessária para manter a saturação completa dentro da pasta de cimento e para compensar a retração química da pasta para o grau máximo esperado de hidratação. Entretanto, mesmo quando a cura interna é usada, a perda de água a partir da superfície deve ser minimizada, ou seja, é necessário realizar a cura externa (BENTZ, LURA e ROBERTS, 2005).

Para Bentz e Snyder (1999) a Equação 12 admite que toda a água do agregado leve estará prontamente acessível para a pasta de cimento. Entretanto, nem toda a água do agregado leve estará disponível para migrar durante a cura, pois depende da dimensão dos poros do agregado. Segundo Rilem TC-196 (2007) a dimensão dos poros do agregado para ser considerado útil é maior que 100 nm, de modo que poros com dimensão inferior não conseguem liberar a água do interior do agregado.

Ainda sobre a Equação 12, Bentz, Lura e Roberts, (2005) observaram que ela proporciona um meio de escolher a quantidade adequada de agregado leve e melhorar a dosagem da mistura. Deve ser considerado a variação química do cimento, a temperatura de cura e o valor relevante para a absorção (ou dessorção) do agregado leve, pois se esses fatores não forem avaliados podem resultar em uma subestimação da quantidade de água de cura interna em mais de 30 % da quantidade necessária. Esse excesso de água pode ocasionar um desempenho abaixo do esperado no material final.

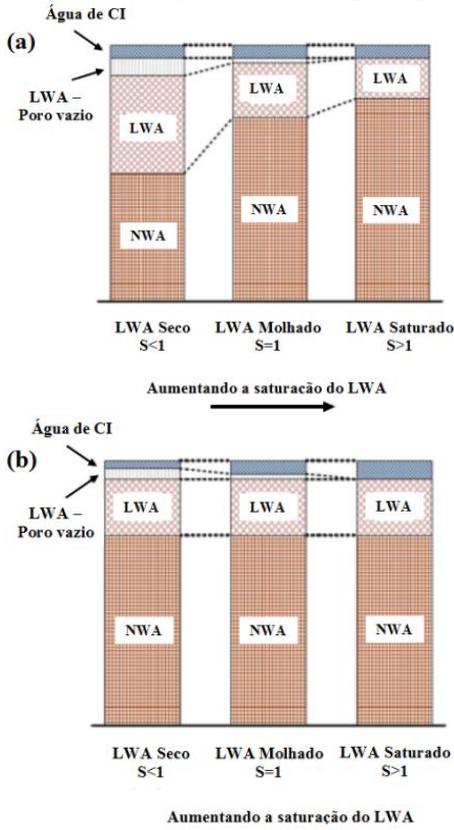
A quantidade de agregado leve utilizado nos concretos, geralmente, representa em torno de 25 % (em volume) do total de agregado e a saturação ocorre por imersão em água por um período de 24 horas. O autor verificou isso em seu relatório no qual analisou pesquisas da Alemanha, Holanda, Arábia Saudita, Israel, Japão e Estados Unidos (HOFF, 2002).

No estudo de Henkensiefken *et al.* (2009) as argamassas confeccionadas com relação a/c 0,30 e com 24 % de agregado leve apresentaram melhor desempenho perante sorptividade a água e a condutividade elétrica que a argamassa de referência com areia de rio com a/c 0,25. Concluindo que a adição do agregado leve como agente de cura aumentou o grau de hidratação, produzindo uma microestrutura e zona de transição interfacial mais densa, como também, melhorou a durabilidade, devido à redução da porosidade e da permeabilidade.

A quantidade de agregado leve necessário para a cura interna está diretamente relacionada com o grau de saturação do agregado leve. À medida que o grau de saturação aumenta (S aumenta), a quantidade de agregado leve para fornecer o volume necessário de água de cura interna irá diminuir proporcionalmente (Figura 3a). Se o mesmo volume de agregado leve é utilizado, o valor fornecido de água para a cura interna será proporcional ao grau de saturação do agregado. Por exemplo, para um agregado que tem uma saturação superior, o volume de cura interna fornecido será também superior (Figura 3b) (GOLIAS, CASTRO e WEISS, 2012).

A água de cura interna deve ser distribuída uniformemente em todo o concreto. Isso é especialmente importante para a cura em idades posteriores, quando a distância que a água pode migrar tornar-se limitada a centenas de micrômetros, devido à permeabilidade sempre decrescente da pasta de cimento no processo de hidratação (BENTZ e SNYDER, 1999). Por isso, o espaçamento entre as partículas do agregado leve deve ser levado em consideração, se muito grande, a pasta em torno dos agregados pode não ter acesso à água do reservatório interno dentro de um tempo razoável (ZHUTOVSKY, KOVLER e BENTUR, 2002). Para resolver esse problema, alguns autores citam que a dimensão ideal do agregado leve para auxiliar na cura interna seja inferior a 4,8 mm, pois assim a distância entre os reservatórios internos é minimizada, a distribuição dos agregados no material cimentício é uniforme e sua dispersão é maior quando comparado com agregados graúdos (JENSEN e HANSEN, 2001; ZHUTOVSKY, KOVLER e BENTUR, 2002; HENKENSIEFKEN, 2008).

Figura 3: Proporções do agregado. O volume total de agregado leve é composto por sólidos, poros cheios de água (água de cura interna) e poros vazios.



(a) Misturas fornecendo o mesmo volume de água de cura interna vão requerer diferentes volumes de agregado leve, dependendo do grau de saturação.

(b) Misturas com o mesmo volume de agregado leve proporcionará diferentes volumes de água de cura interna para diferentes valores de saturação.

Fonte: Adaptado de Golias, Castro e Weiss, 2012.

Para analisar o movimento da água dentro de materiais cimentícios durante as primeiras idades de cura, Bentz e Hansen (2000) utilizaram a técnica de absorção de raios-X. Os autores observaram com o ensaio em argamassas de alto desempenho no primeiro dia de hidratação que muitos dos poros, inicialmente cheios de água no interior das partículas do agregado leve saturado previamente, estavam vazios. Sendo essa, uma característica apreciável para o agregado leve no processo de cura interna, já que esse é o tempo considerado crítico para evitar a fissuração em idades precoces.

Bentz *et al.* (2006), após o preparo e moldagem da amostra, observaram alguns poros vazios dentro das partículas de agregado leve

concluindo que esses poros podem ser devido a poros inacessíveis e/ou isolados a uma fonte exterior de água, saturação ineficiente ou parcialmente eficiente no preenchimento dos poros interconectados com água, ou ainda esses poros foram saturados, entretanto esvaziados durante a mistura inicial e moldagem da amostra.

Em idades iniciais, devido à elevada permeabilidade da pasta de cimento, a água é capaz de se mover rapidamente ao longo de uma distância de, pelo menos, vários milímetros (LURA *et al.*, 2006; BENTZ e HANSEN, 2000). Desse modo, se espera que a pasta de cimento hidratando permaneça saturada dentro de uma distância de, no mínimo, 2 mm a partir de um reservatório interno (BENTZ *et al.*, 2006).

A distância que a água percorre do interior do reservatório interno para dentro da pasta de cimento, em cada período da hidratação (inicial, médio e tardio), pode ser estimado com o auxílio das Equação 13 a Equação 17. Os autores partiram do princípio que a taxa de fluxo da água é igual ao valor necessário para manter a saturação na pasta de cimento durante o processo de hidratação e consideraram que o tamanho dos poros dos reservatórios de água é fixo, enquanto que os poros da pasta de cimento diminuem, continuamente, com a hidratação (WEBER e REINHARDT, 1999; BENTZ *et al.*, 2007).

O fluxo volumétrico (Q) da água através de um poro cilíndrico na pasta de cimento no processo de hidratação é determinado com a Equação 13, com o auxílio da Equação 14 pode-se determinar o valor da permeabilidade (k), e com a Equação 15 pode-se estimar a queda da pressão (ΔP), considerando que o único fluxo é a partir do poro do agregado leve para os poros da pasta de cimento no processo de hidratação devido ao diferencial de pressão entre eles:

$$Q = \frac{-\pi \times R_{pasta}^2 \times k \times \Delta P}{\mu \times L} \quad \text{Equação 13}$$

$$k = \frac{R_{pasta}^2}{8} \quad \text{Equação 14}$$

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R_{res}} - \frac{2\sigma}{R_{pasta}} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

Q = fluxo volumétrico da água (m³/s);

R_{pasta} = raio do poro na pasta de cimento durante a hidratação (m);
 σ = tensão superficial da água (0,07275 Pa.m a 20° C);
 R_{res} = raio do poro do reservatório de água (m) (WEBER e REINHARDT, 1999; BENTZ *et al.*, 2007).

O fluxo da água deve equilibrar a demanda de água do concreto devido à retração química em curso. Com a Equação 16 é determinado o fator de preenchimento ($\partial\varepsilon/\partial t$), que é a demanda de água por unidade de volume da porosidade do concreto para manter a saturação.

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} = \frac{CS \times \left(\frac{\partial\alpha}{\partial t}\right) \times Cf}{\rho_w \times \Phi_{\text{concreto}}} \quad \text{Equação 16}$$

Com o auxílio da Equação 17, têm-se o valor da distância percorrida pela água:

$$L = \sqrt{\frac{k \times |\Delta P|}{\mu \times \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}\right)}} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

ΔP = queda da pressão (Pa);

μ = viscosidade do fluido (0,001002 Pa.s para a água a 20° C);

L = distância percorrida pela água (m);

K = permeabilidade da pasta (m²);

$\partial\varepsilon/\partial t$ = fator de preenchimento (s⁻¹);

CS = retração química do cimento (kg de água / kg de cimento);

$\partial\alpha/\partial t$ = taxa de hidratação (s⁻¹);

Cf = teor de cimento para mistura de concreto (kg/m³);

ρ_w = densidade da água (998,23 kg/m³ a 20° C);

Φ_{concreto} = porosidade capilar do concreto (WEBER e REINHARDT, 1999; BENTZ *et al.*, 2007).

Na Tabela 5 têm-se um exemplo de dados utilizados e a distância que o fluxo da água percorre a partir do agregado leve para a pasta de cimento com baixa relação água/ aglomerante (0,2 a 0,4) no concreto, os autores fixaram o raio do reservatório de água (R_{res}) em 10 μm , a retração química do cimento (CS) em 0,07 kg de água/ kg de cimento e o

teor de cimento (Cf) em 700 kg/m³ (NYAME e ILLSTON, 1980 *apud* BENTZ *et al.*, 2007).

Tabela 5: Distância que o fluxo da água alcança na pasta de cimento com variação do período de hidratação.

Idade (dias)	k (m²)	R_{pasta} (m)	ΔP (Pa)	∂α/∂t (s⁻¹)	φ_{concreto}	∂ε/∂t (s⁻¹)	Distância do fluxo (mm)
Inicial (<1)	1E-17	1E-6	-130950	6,9E-6	0,120	2,8E-6	21,40
Médio (1 a 3)	1E-20	1E-7	-1440450	1,2E-6	0,060	9,5E-7	3,90
Tardio (3 a 7)	1E-22	2E-8	-7260450	2,3E-7	0,015	7,6E-7	0,98
Pior caso (>28)	1E-23	2E-8	-7260450	2,3E-7	0,010	1,1E-6	0,25

Fonte: Adaptado de Nyame e Illston, 1980 *apud* Bentz *et al.*, 2007.

Analisando os resultados da distância que o fluxo da água percorre, fica evidente que no período inicial a água consegue se movimentar mais livremente chegando a praticamente 22 mm, no período médio em diante a distância reduz bruscamente devido à contínua hidratação e redução da porosidade da pasta. Pela dificuldade de determinar os valores reais de permeabilidade da pasta e os raios dos poros, o resultado da distância do fluxo é um valor aproximado, entretanto conforme observado os resultados são parecidos com as profundidades de penetração medidos no ensaio de absorção de raios-X, de 20 mm para amostras (a/c= 0,4 e cimento Portland comum) imediatamente ensaiadas e 4 mm para as amostras com 1 a 3 dias de idade no estudo de Bentz (2002) e também verificado por Zhutovsky, Kovler e Bentur (2004) e Bentz *et al.* (2007).

Verifica-se que, em idades tardias (≥ 28 dias) a distância que a água consegue movimentar-se fica limitada a uma distância de 100 a 200 μm , devido à permeabilidade decrescente da pasta de cimento. Desse modo é evidente a necessidade de utilização de agregados leves finos, por conseguirem uma distribuição uniforme pelo material cimentício.

É técnica e cientificamente reconhecida que a durabilidade das estruturas de concreto pode ser melhorada pela cura interna, dependendo do agente de cura. Entre os agentes de cura mais eficazes têm-se polímeros superabsorventes ou agregado leve saturado (especialmente os que têm alta relação de porosidade aberta/ fechada e boas propriedades mecânicas, tal como a pedra-pome). Alguns produtos derivados da madeira, agregados reciclados e até mesmo agregados com peso normal introdu-

zidos na mistura de concreto em condição saturado com água, também podem reduzir a retração autógena e melhorar a durabilidade dos materiais (RILEM TC-196, 2007; AITCIN, 2016).

Fica evidente que a cura interna é um processo eficaz e de fácil acesso para melhorar as características dos materiais à base de cimento, como argamassas, concretos convencionais e principalmente concretos de alto desempenho (no qual utiliza-se baixa relação a/c ($< 0,4$) gerando baixas permeabilidades e conseqüentemente impossibilita o acesso da água de cura externa em toda a estrutura). Uma vez que esse processo auxilia no fornecimento de água para a hidratação do cimento a uma taxa requerida para satisfazer a auto dessecação ou a umidade perdida por evaporação; a retração química e autógena; auxilia na melhora da zona de transição interfacial reduzindo a porosidade e a permeabilidade do material, e com isso reduz a infiltração de agentes deletérios para o interior do material cimentício, tornando a estrutura mais durável.

3.1 PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS LEVES

O agregado leve, segundo a norma europeia EN 13055-1 (2002), é o material mineral com massa específica que não ultrapasse o valor de 1200 kg/m^3 , tais como agregado natural, subprodutos de processos industriais e agregado reciclado. Já, a norma brasileira NBR 12655 (2015) estipula que agregado leve é aquele que apresenta massa específica inferior a 2000 kg/m^3 , como, por exemplo, agregados de argila expandida, escória siderúrgica, vermiculita e ardósia.

A água absorvida pelo agregado leve antes do contato com os componentes da argamassa é liberada a partir dos poros do agregado leve para os poros capilares da pasta. Os agregados leves com grande quantidade de poros menores, não liberam facilmente a água interna disponível, sendo o limite inferior do tamanho de poro para ser considerado útil em torno de 100 nm (ZHUTOVSKY, KOVLER e BENTUR, 2002; LURA, 2003; JENSEN e LURA, 2007; RILEM TC-196, 2007).

Devido à diferente distribuição do tamanho dos poros dentro de vários agregados leves, eles podem ter significativamente diferentes propriedades de dessecção. Para fins de cura interna, as propriedades de dessecção são mais importantes do que as propriedades de absorção (LURA, 2003; BENTZ, LURA e ROBERTS, 2005).

Paul e Lopez (2011) compararam a eficiência da cura interna de alguns agregados leves (argila expandida, pedra-pome, ardósia expandida) e demonstraram que a eficiência da cura interna do agregado leve é afetada pela sua velocidade de liberação da água, sendo que o ideal,

concluído pelos autores, era a utilização de menor volume de agregado leve com uma liberação de água mais rápida.

No estudo de Golias, Castro e Weiss (2012), foram preparadas argamassas com relação a/c 0,30 (em massa), adição de água para a cura interna (variando da relação a/c 0,03 a 0,11), substituíram o agregado miúdo de rio por xisto expandido (como agregado leve), variando a quantidade substituída de 9 a 28 % e o estado do agregado leve utilizado (seco em estufa, saturado por 24 horas por imersão ou saturado no vácuo). Os resultados mostraram que quando o agregado leve foi utilizado na condição seco em estufa, absorve água da pasta. Contudo, a maior parte da água absorvida pelo agregado foi devolvida para a cura da pasta. O agregado leve pré-molhado obteve benefícios de cura interna (aumento da resistência mecânica e do grau de hidratação e redução da retração autógena e sorptividade da água). Já, quando o agregado leve foi saturado a vácuo apresentou maior quantidade de água nos poros menores, entretanto nesses poros menores, é mais difícil para a água de CI migrar para a pasta de cimento, mesmo assim estas misturas mostraram, relativamente, bom desempenho de CI.

Já, de acordo com Kabay e Akoz (2012) a saturação do agregado leve (pedra-pome) imerso em água por 24 horas ou saturado a vácuo apresentaram propriedades semelhantes entre eles nas propriedades avaliadas (trabalhabilidade, massa específica, resistência à compressão e retração por secagem) do que quando o agregado leve foi colocado apenas 30 minutos antes do preparo da mistura em contato com a água. Ou seja, para o agregado leve ser eficiente como agente de cura interna é necessário que os poros do agregado fiquem completamente saturados e não apenas superficialmente.

Os agregados desejáveis para utilização como agente de cura são porosos, de modo que absorvam e mantenham a água no seu interior e em altas umidades relativas ($UR > 93\%$) liberem a água dos poros. Em contraste, um agente de cura menos eficiente não consegue liberar uma parte significativa da água absorvida em altas UR, implicando que esta água não estará disponível para a reação de hidratação do cimento e cura do material (CASTRO *et al.*, 2011).

Henkensiefken (2008) analisou isotermas de dessorção dos agregados leves e agregado reciclado de concreto e observou que a maioria da água é perdida em alta umidade relativa ($UR > 96\%$) para os agregados de xisto expandido, implicando que esses agregados leves apresentam poros maiores que 100 nm e a água estará disponível para ser liberada do agregado para a pasta de cimento em elevada UR, sendo essa uma característica apreciável para a cura interna, pois garante que a água

vai ser liberada no período inicial da hidratação. Já, no agregado reciclado percebe-se que menos da metade da água estará disponível em alta UR, tornando-o menos adequado para a cura interna (HENKENSIEF-KEN, 2008; KIM E BENTZ, 2008; CASTRO *et al.*, 2011).

De acordo com Ghourchian *et al.* (2013), a maior parte da água absorvida é liberada em UR elevada ($> 97\%$) para o agregado leve de argila expandida (LECA), pois o teor de água abaixo desse valor de UR já é muito baixo ao valor determinado para ser a saturação completa do agregado, com isso esse material pode ser utilizado como um agente de cura interna eficiente. Logo, o agregado de zeólita foi capaz de absorver um teor maior de água, porém o agregado libera pouca água em altas UR.

A durabilidade das argamassas depende da permeabilidade do material, por isso é necessário conhecer as propriedades do agregado leve utilizado, pois o excesso de água livre forma os poros capilares (responsáveis pela porosidade permeável) e a diferença dos valores do módulo de deformação do agregado e da matriz de cimento causam solicitações internas (responsáveis pelo aparecimento de fissuras internas que influenciam a permeabilidade) (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2004).

As propriedades (resistência mecânica, massa específica, absorção e dessorção) dos agregados leves variam significativamente dependendo da matéria prima e da técnica utilizada para a produção. Devido a isso, torna-se difícil especificar as propriedades de diferentes tipos de agregados leves. Assim, as propriedades dos materiais cimentícios produzidos com agregados leves irão variar conforme classificação dos agregados, teor de umidade, proporção das misturas, teor de cimento, entre outros (CHANDRA e BERNTSSON, 2002).

3.2 INFLUÊNCIA DO AGREGADO LEVE NA ZONA DE TRANSIÇÃO INTERFACIAL

A zona de transição interfacial (ZTI) é formada quando filmes de água se formam em torno das partículas do agregado no concreto fresco levando a um aumento da relação água/ cimento (a/c) na pasta hidratada ao redor das partículas do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2006). A zona de transição interfacial é frágil, composta principalmente de poros e hidróxido de cálcio solúvel em água, além disso, é a fase limitante da resistência do concreto (LOPEZ, 2005; MEHTA e MONTEIRO, 2006).

A acumulação de água na ZTI constitui a área mais permeável dentro do concreto, abrindo caminho para a difusão de íons cloreto. A

qualidade da ZTI depende do tipo e da qualidade dos agregados, da relação a/c e do método utilizado para a produção do concreto (LOPEZ, 2005).

A água contida no agregado leve pode melhorar a hidratação por meio da cura interna. A partir desta perspectiva, o agregado leve saturado conduz a uma melhor hidratação do cimento e conseqüentemente apresentará uma zona de transição interfacial melhorada, de modo que a microestrutura será mais densa, homogênea e menos porosa (ZHANG e GJORV, 1990; KATZ, BENTUR e KJELLEN, 1999; BENTZ, 2009; CASTRO, 2011). Devido a esse efeito e a maior porosidade dos agregados, a interface da zona de transição agregado-pasta é também melhorada e a resistência à compressão é essencialmente afetada pela resistência do agregado (BOGAS, BRITO e FIGUEIREDO, 2015).

Na Figura 4 têm-se a diferença entre a zona de transição interfacial do agregado leve e do agregado de peso normal, onde ficam evidentes as conclusões dos autores acima mencionados, onde a superfície rugosa do agregado leve e a liberação da água auxiliam na criação de uma ZTI mais densa, menos porosa e permeável, devido à hidratação contínua e com melhor qualidade que o agregado de peso normal, que por não ser absorvente cria uma fina película de água ao redor do grão, o que permite a criação de uma ZTI porosa e fraca, fornecendo uma entrada preferencial para agentes deletérios.

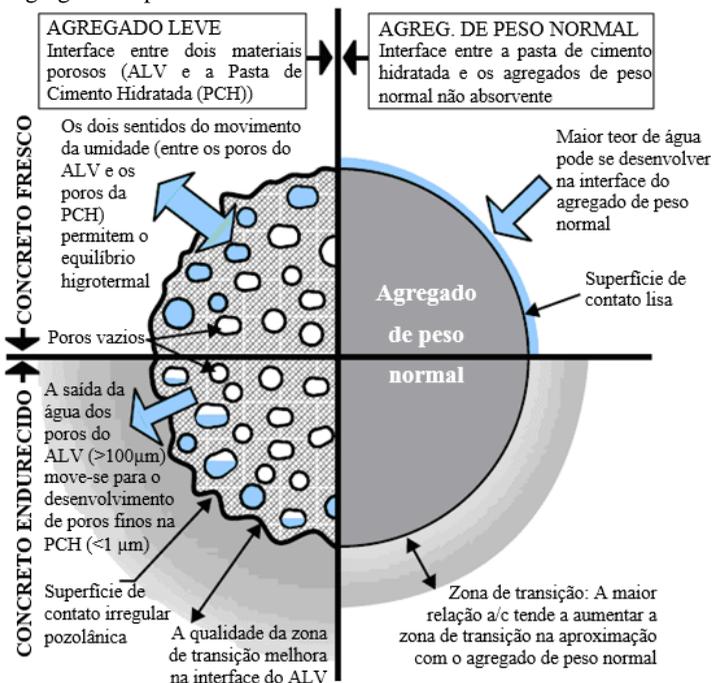
Corroborando com o exposto na Figura 4, Sun *et al.* (2015) verificaram a elevada porosidade do agregado leve frente ao agregado natural. Por micrografias verificaram que os limites do agregado leve são relativamente difíceis de serem distinguidos e a pasta de cimento é distribuída de forma mais uniforme com menos partículas não hidratadas. Já, os limites do agregado natural são nítidos, a zona de transição interfacial contém mais partículas de cimento não hidratadas e uma estrutura porosa aparente.

A interface entre o agregado leve e a matriz de cimento apresenta baixa porosidade e caracteriza-se pela alta ancoragem mecânica entre o agregado e a matriz de cimento, conseqüência da absorção de água e da rugosidade da superfície do agregado (ZHANG e GJORV, 1990).

A interação entre o agregado leve e a baixa relação a/c da pasta pode ocorrer por meio de: (a) fenômenos físicos, como melhor hidratação proporcionada pela água liberada a partir do agregado leve saturado; (b) fenômenos mecânicos, bloqueio entre a matriz e a superfície áspera e porosa do agregado; e (c) fenômenos químicos, tal como pela atividade pozolânica entre o agregado e a matriz (LOPEZ, 2005). De acordo com Chandra e Berntsson (2002) os agregados leves melhoram a qualidade

da ZTI, por causa da sua pequena superfície pozolânica, que consome o hidróxido de cálcio, e a sua superfície de absorção, que reduz a película de água em torno do agregado. Bem como, a pasta de cimento durante a mistura pode penetrar na maioria dos poros abertos do agregado leve. Porém, essa penetração depende da microestrutura da superfície dos agregados, do tamanho do grão de cimento e da viscosidade da pasta (ZHANG e GJORV, 1992).

Figura 4: Cura interna na zona de contato: diferenças entre o agregado leve e o agregado de peso normal no estado fresco e endurecido do concreto.



Fonte: Adaptado de ESCSI, 2010.

A zona de transição interfacial é considerada o elo mais fraco no material cimentício, devido à alta relação a/c que se encontra ao redor do agregado, o que forma uma estrutura mais porosa e produtos de hidratação relativamente grandes, sendo esses, cristais em placa de hidróxido de cálcio e etringita. Percebe-se também, que na ZTI tem-se uma quantidade muito pequena de C-S-H.

Para melhorar a resistência do material cimentício deve-se primeiramente reforçar a zona de transição agregado-pasta. A melhora da

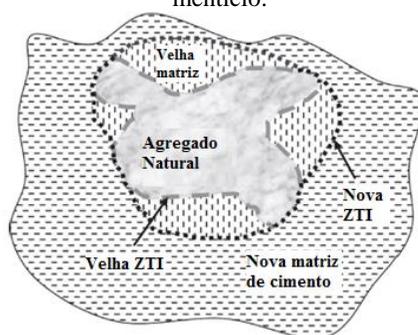
qualidade contribui significativamente para a redução da permeabilidade dos concretos leves em comparação com os concretos tradicionais, além de que é na ZTI aonde ocorrem as primeiras microfissuras do concreto, quando solicitado mecanicamente (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2004).

3.3 AGREGADO RECICLADO

O resíduo da construção civil (RCC) pode ser britado e utilizado como agregado reciclado miúdo ou graúdo para base e sub-bases de pavimentação, para concretos, argamassas, entre outros, em substituição ao agregado natural. O agregado reciclado é um material sustentável, e devido à sua origem apresenta propriedades como alta absorção e porosidade elevada, pois em resumo o agregado reciclado é o agregado natural envolto por pasta de cimento ou tem origem cerâmica, o que em materiais cimentícios pode afetar as propriedades do material final.

A microestrutura do material cimentício com agregado reciclado é diferente da microestrutura do material cimentício com apenas agregado natural, uma vez que os agregados reciclados são constituídos por argamassa aderente da antiga matriz de cimento no agregado natural e assim levam à formação de duas zona de transição interfacial (ZTI), uma entre o agregado natural e a antiga matriz de cimento e outra entre a antiga matriz e a nova matriz de cimento, conforme mostrado na Figura 5 (XIAO *et al.*, 2013; KISKU *et al.*, 2017).

Figura 5: Esquema da nova e velha ZTI do agregado reciclado no material cimentício.



Fonte: Adaptado de KISKU *et al.*, 2017.

Para Kou e Poon (2008) e Duan e Poon (2014) a resistência mecânica pode ser melhorada devido à presença da argamassa de cimento

ligada no agregado reciclado, promovendo uma melhor ligação entre o agregado reciclado e a nova pasta de cimento. Além disso, a superfície áspera do agregado reciclado também pode melhorar a microestrutura da zona de transição interfacial e aumentar a resistência à tração.

Pelas características de alta absorção e menor massa específica do agregado reciclado quando comparado com o agregado natural de peso normal, o Rilem TC-196 (2007) e Kim e Bentz (2008) consideram o agregado reciclado como um potencial agente de cura.

No estudo de Jochem (2012) e Jochem, Rocha e Cheriaf (2014) foi comprovado que o agregado reciclado (D/d: 2,4/ 0,15 mm) saturado previamente, com substituição total pelo agregado natural, em argamassas, apresentou resultados satisfatórios para ser utilizado em obras de engenharia, sem perdas significativas nas propriedades do material, além disso, o fino do agregado reciclado ($< 0,15$ mm) auxiliou na plasticidade das argamassas.

Bem como, Yildirim, Meyer e Herfellner (2015) perceberam que a resistência mecânica aumenta com o grau de saturação, de 0 a 100 %, do agregado reciclado de concreto ($< 4,8$ mm) antes do preparo do material cimentício, com substituição parcial do agregado natural nos teores de 50 a 100 %. Bem como, as partículas de cimento contidas no agregado reciclado devido à pasta de cimento aderida, pode aumentar a quantidade de gel de C-S-H no material.

Na Espanha, o código de concreto estrutural (EHE-08, 2008) regula a utilização do agregado reciclado de concreto em até 20 % (em massa), com dimensão superior a 4 mm, sendo proibido à utilização do agregado reciclado fino devido à sua alta capacidade de absorção e maior probabilidade de conter impurezas. Por outro lado, estudos recentes mostram que a fração fina apresenta propriedades semelhantes à fração graúda (MULLER, STARK, 2005). Nesse sentido a utilização do agregado reciclado fino em argamassas potencializa a utilização desse material, pois a argamassa não está sujeita a normas estruturais que comportam medidas conservadoras na concepção e utilização dos materiais.

A britagem dos resíduos de concreto produz um grande volume de matéria fina (< 5 mm) que é rico em cimento hidratado. A baixa massa específica, a alta absorção, a solidez inferior e a distribuição irregular da fração fina (em relação à fração > 5 mm), muitas vezes impedem a sua utilização como agregado. Com isso Coleman, Lee e Slipper (2005) perceberam que a fração fina pode vir a ser um sorvente eficaz para espécies de metais pesados no estado líquido em virtude de suas fases de íons trocáveis e pH elevado.

Concretos com agregado reciclado apresentam um aumento contínuo da hidratação com o tempo, segundo Kou, Poon e Etxeberria (2011). Os autores analisaram a resistência à compressão e a porosidade de amostras nos períodos de 28 dias, 1 ano e 5 anos, em concretos com substituição total do agregado natural por agregado reciclado de concreto (dimensão de 10 mm e 20 mm), com relação a/c 0,55 e agregado miúdo de rio, o concreto de referência foi feito com agregado graúdo granítico. Concluíram que a porosidade das amostras diminui com o passar do tempo, enquanto que a resistência aumenta, sendo esse aumento mais expressivo para os concretos com agregado reciclado em sua composição. Com 5 anos a amostra com agregado reciclado e a amostra com agregado natural apresentaram praticamente a mesma resistência (58,9 MPa para a referência e 55,4 MPa para o concreto com RCC) e um aumento da resistência dos 28 dias até os 5 anos de 34 % para a referência e 62 % para o concreto com RCC. A pasta de cimento aderida nos grãos do agregado reciclado auxiliou para uma melhor interação entre a nova e a velha pasta e nas propriedades da ZTI dos concretos. O aumento contínuo da hidratação dos concretos com o agregado reciclado relatado por Kou, Poon e Etxeberria (2011) pode estar ligado à cura interna desses concretos, com o agregado reciclado trabalhando como agente de cura.

De acordo com o Kovler e Jensen (2007) e Kim e Bentz (2008) as diferentes técnicas de cura interna (CI), como utilização do agregado reciclado, polímero superabsorvente e agregado leve, chegam à mesma resposta (redução da retração autógena e da auto-dessecação, zona de transição interfacial e microestrutura da pasta mais densa, redução da permeabilidade e porosidade, maior resistência a fissuras e consequentemente maior durabilidade, devido à hidratação contínua da pasta de cimento), mas em graus diferentes, em ambas as condições saturadas e secas previamente.

Kim e Bentz (2008), analisando concretos de alto desempenho com agregado reciclado de concreto e agregado leve, concluíram que ao misturar os dois agregados (D/d: 4,8/ 0,15 mm) fornece a mistura ideal em termos de custos de material e desenvolvimento sustentável.

O desempenho geralmente inferior de argamassas contendo agregados reciclados pode ser parcialmente, se não totalmente, compensado pela cura interna adequada, pois a umidade contida no agregado poroso é gradualmente liberada permitindo a contínua hidratação do cimento (YILDIRIM, MEYER e HERFELLNER, 2015). Estes resultados são promissores porque mostraram que agregados derivados de concreto reciclado podem ser efetivamente usados para obter misturas com de-

sempenho comparável ao de misturas contendo apenas agregados naturais, contribuindo para a sustentabilidade da construção.

Os agregados reciclados de RCC são materiais compostos principalmente de materiais inertes. No entanto, também podem conter materiais perigosos, tais como metais e compostos químicos que podem contaminar o meio ambiente (POON, KOU e LAM, 2002). O impacto ambiental causado pelos agregados reciclados não é determinado pelo seu conteúdo total de contaminantes, mas pela quantidade de contaminante que a água pode dissolver e lixiviar para o solo, atingindo assim, a superfície e/ou a água subterrânea (KOSSON *et al.*, 2002).

Devido à propriedade do agregado reciclado de alta absorção (em comparação com o agregado natural), pode-se utilizá-lo como agente de cura interna. Entretanto, deve-se ater a propriedade de dessecção, o tamanho do poro do agregado e verificar como o mesmo se comportará na argamassa para confirmar a eficácia do agregado como agente de cura. Deve-se, também, verificar se o agregado reciclado pode ser considerado um sorvente químico e adsorver os contaminantes.

3.4 CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA AVALIAR A EFICIÊNCIA DO AGENTE DE CURA

A primeira verificação da eficiência do agente de cura começa antes mesmo da aplicação do agregado leve na matriz cimentícia, com ensaios que determinem a dimensão dos poros dos agregados que serão utilizados. Para isso, tem-se realizado os ensaios de dessecção (com o auxílio da equação de Kelvin-Young-Laplace) e/ou porosimetria por intrusão de mercúrio. Também é realizado o ensaio de absorção nos grãos (HENKENSIEFKEN, 2008). Esses ensaios são realizados com o intuito de verificar se o agregado leve terá a capacidade de liberar a água do seu interior quando solicitado. Como já relatado anteriormente, de acordo com alguns autores, os agregados leves devem apresentar diâmetro de poro superior a 100 nm e, em altas umidades relativas (> 90 °C), devem liberar a água do seu interior para a pasta de cimento.

Na bibliografia sob o tema, verificou-se que os ensaios experimentais mais utilizados para verificar a eficácia da cura interna são: umidade relativa interna; retração autógena; resistência mecânica; calor de hidratação; micro tomografia de raios-X; absorção; dessecção; e sorptividade a água (LURA, 2003; BENTZ *et al.*, 2006; CUSSON e HOGEVEEN, 2008; GOLIAS, CASTRO e WEISS, 2012).

Para entender o processo de cura interna, a avaliação da distância em que o transporte de água é eficaz em uma mistura cimentícia é de

fundamental importância. Uma melhor compreensão pode ser conseguida com técnicas mais complexas, tais como a absorção de raios-x (BENTZ e HANSEN, 2000) ou ressonância magnética nuclear (BREMNER *et al.*, 2002). Ambas as técnicas são não destrutivas e capazes de verificar o transporte da água durante o endurecimento da pasta de cimento e quantificar o fluxo da água a partir do agregado leve. Entretanto, não existem normas técnicas que especifiquem valores mínimos para classificar a aceitação do agente de cura, para os ensaios citados acima, cada autor compara os resultados com a sua referência.

3.5 SÍNTESE

Nesse capítulo foi abordado sobre a cura interna ocasionada pelos agentes de cura, com foco para os agregados leves e os principais meios de avaliar o desempenho dos agentes de cura interna no material cimentício.

Alguns agregados leves podem atuar como um agente de cura interna em produtos à base de cimento Portland. A liberação da água absorvida previamente, do interior dos seus grãos para a pasta, altera a microestrutura da pasta pela melhoria do processo de hidratação do cimento. Dessa forma, evita-se que falte água para hidratação do cimento durante os primeiros dias ou semanas de hidratação.

Assim sendo, a cura interna ocorre pela quantidade de água no interior dos agregados, os agregados funcionam como um reservatório interno, que devido à formação dos produtos hidratados do contato do cimento com a água, essa água dos reservatórios internos vai ser liberada para auxiliar na melhor hidratação do cimento e evitar que fiquem poros vazios no material cimentício.

Para uma eficiente cura interna o agregado leve deve ser distribuído de forma igualitária e uniforme na pasta, para isso é recomendado à utilização do agregado leve com dimensão inferior a 4,8 mm e os poros do agregado leve devem possuir diâmetro superior a 100 nm. Além desses cuidados, deve-se ater também, a quantidade de agregado leve adicionado a mistura, para evitar o excesso de água na pasta, o qual ocasionaria um produto final com qualidades indesejáveis (poroso, permeável, baixa resistência mecânica e com maior potencial de lixiviação).

Pelo fato do agregado reciclado apresentar uma superfície rugosa, tem-se por hipótese que pode-se melhorar a ligação/ interação da pasta de cimento com o agregado e, conseqüentemente, contribuir para a melhoria das propriedades da ZTI, reduzindo a porosidade e a permeabilidade do sistema.

O material cimentício produzido com agentes de cura apresenta como material final um produto com características aprimoradas, como redução da permeabilidade e porosidade por tornar mais densa a microestrutura da matriz e da ZTI, com consequente ganho na durabilidade do material por reduzir a entrada e saída de agentes deletérios.

A utilização do agregado reciclado como sorvente químico no processo de solidificação/ estabilização auxiliaria para uma redução da utilização de matéria-prima natural, redução do custo, aumento contínuo da hidratação com o tempo pelo método de cura interna, consequentemente, melhorando a qualidade da ZTI e da microestrutura, para um formato mais denso e menos poroso e com resistência mecânica que atenda aos critérios das normas. A utilização do RCC como sorvente químico em matrizes cimentícias é um procedimento que ainda não foi verificado na bibliografia.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Na presente pesquisa foi avaliado o potencial de aplicação do agregado reciclado como sorvente químico e agente de cura interna para melhoria do processo de solidificação/ estabilização de metais pesados.

Para tanto, esse trabalho foi dividido em duas partes principais, sendo que na primeira parte (preparo do material sintético) foram realizadas as seguintes etapas metodológicas:

- Etapa 01: Caracterização das matérias-primas, estudo das propriedades físicas e de comportamento higrotérmico do esqueleto granular em diferentes frações granulométricas (composição dos agregados leves e reciclados);

- Etapa 02: Preparo do material sintético. Avaliação da eficiência da matriz granular como produto de cura interna em diferentes composições com cimento Portland;

- Etapa 03: Avaliação da eficiência da matriz granular na retenção de metais pesados;

E, na segunda parte (aplicação do lodo galvânico – caso real) foram realizadas as seguintes etapas:

- Etapa 04: Caracterização física e higrotérmico das matérias-primas;

- Etapa 05: Aplicação das matrizes granulares otimizadas no caso real de um resíduo do processo de galvanoplastia contaminado com metais pesados.

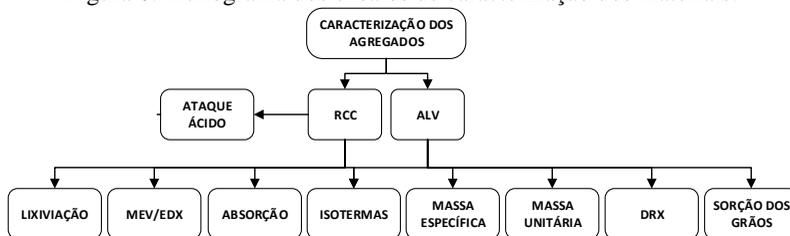
- Etapa 06: Averiguar a eficiência da matriz granular como produto de cura interna e na retenção de metais pesados em diferentes composições com cimento Portland e em diferentes teores de lodo de galvanoplastia.

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas as estruturas da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC (Brasil) e da Universidade Politécnica da Catalunya – UPC (Espanha).

Nas etapas metodológicas 01 e 04 foram caracterizados os materiais (agregado natural, leve e reciclado) perante as propriedades físicas e higrotérmicas, conforme apresentado na Figura 6. Nesta fase foi verificado o esqueleto granular do agregado reciclado e do agregado leve, com o intuito de controlar a equivalência da massa específica e adicionar a quantidade proporcional dos materiais. Foi analisada, também, a lixiviação dos agregados, para saber quais são os metais pesados presentes no material. O ensaio de isotermas de dessorção foi realizado para verificar o potencial de liberação da água do interior dos agregados e

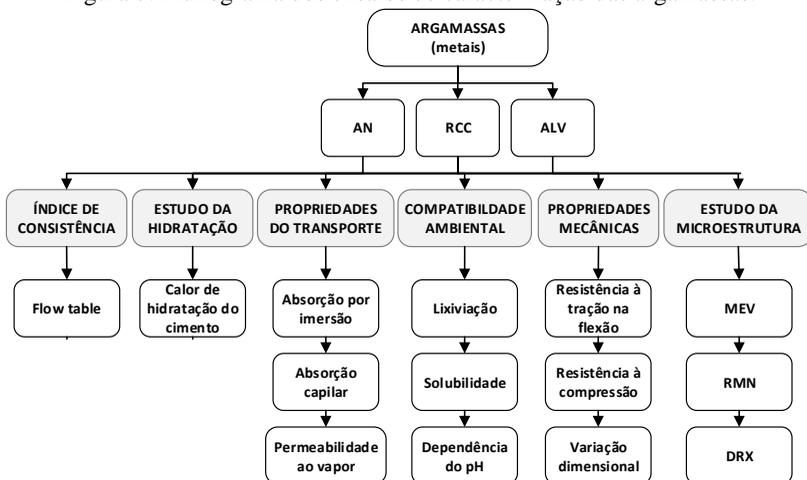
analisar o potencial dos agregados como agente de cura interna. Foi verificada por análise de espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDX) a composição química do cimento e dos agregados. O resíduo de galvanoplastia foi caracterizado por difratometria de raios-X (DRX), fluorescência de raios-X e ataque por água regia.

Figura 6: Fluxograma dos ensaios de caracterização dos materiais.



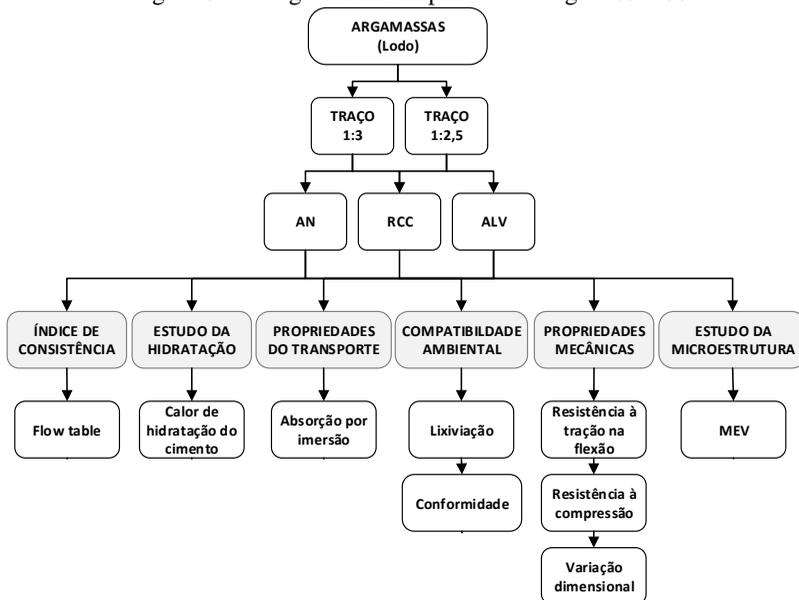
Para a realização das etapas metodológicas 02 e 03 foi realizada o preparo do material sintético e caracterizado as argamassas perante as características físicas, químicas, hidrotérmicas e mecânicas (Figura 7). Esses ensaios foram realizados para comprovar a eficiência do agregado reciclado, como agente de cura e sorvente químico, bem como, verificar a retenção dos metais pela matriz cimentícia. Foi realizado o ensaio de índice de consistência (*flow table*) para garantir a trabalhabilidade da argamassa quando aplicada em obras de engenharia. O ensaio de calor de hidratação foi realizado com o intuito de analisar as alterações (no desenvolvimento da pega e ganho de resistência) ocorridas pela cura interna e pela incorporação dos metais pesados nas argamassas. Os ensaios de lixiviação e solubilidade foram realizados para verificar a mobilidade dos contaminantes e verificar se os teores lixiviados estão de acordo com o máximo permitido em norma. O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado para verificar os benefícios da cura sobre as propriedades de transporte. O ensaio de absorção por imersão foi realizado para calcular o índice de vazios das argamassas. Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difratometria de raios-X (DRX) e ressonância magnética nuclear (RMN) foram realizados para determinar alterações mineralógicas nas argamassas devido à incorporação do metal pesado e da realização da cura interna e caracterização química para verificar a imobilização dos contaminantes na estrutura sólida das amostras. Por fim, foram realizados os ensaios de resistência mecânica, para conferir a alteração da resistência das argamassas com o metal pesado e com a realização da cura interna.

Figura 7: Fluxograma dos ensaios de caracterização das argamassas.



Na segunda parte da pesquisa foi preparado o lodo solidificado (etapas metodológicas 05 e 06) para verificar a eficácia do procedimento proposto nesse trabalho com a incorporação do resíduo e do agregado poroso. Para isso, foram realizados os ensaios citados na Figura 8.

Figura 8: Fluxograma das etapas metodológica 05 e 06.



A nomenclatura utilizada para as misturas corresponde à abreviatura do agregado utilizado: agregado natural (AN), agregado reciclado (RCC) e agregado leve (ALV); seguido da abreviatura do metal pesado adicionado na mistura: chumbo (Pb), zinco (Zn) e cromo (Cr) e do teor utilizado: 100 ou 300 ppm; por fim a abreviatura SAT (saturado previamente) nas misturas que o agregado foi utilizado saturado sem água superficial para o preparo das misturas. As amostras sem metal pesado apresentam a abreviatura de referência na frente da nomenclatura (REF).

4.1 MATERIAIS

Para a realização desse estudo utilizou-se: água destilada e deionizada, cimento Portland CP II F-32 e CEM II/B-L 32,5, agregado natural, agregado reciclado, agregado leve, metais pesados de cromo hexavalente, chumbo tetravalente e zinco bivalente na forma de sais e resíduos do processo industrial de galvanoplastia contaminado com metais pesados. A seguir será explanado sobre cada item.

4.1.1 Água

A água utilizada para saturar os agregados previamente, para o preparo das argamassas e para a realização dos ensaios que necessitaram, foi destilada e deionizada para evitar a presença de sais.

4.1.2 Cimento

Na Tabela 6 estão descritos os principais resultados da análise química e física, disponibilizada pelos fornecedores e analisado por EDX, dos cimentos utilizados na pesquisa. Para a confecção das argamassas com incorporação de metais pesados em forma de sais foi utilizado o cimento Portland composto com *filer* calcário, CPII-F, classe 32, pela ausência de adições como pozolanas e escórias. Esse cimento é o mais consumido no Brasil, sendo que em 2013 este valor foi de 62 % (SNIC, 2013). Já, para o preparo do lodo solidificado (etapas metodológicas 05 e 06) foi utilizado o cimento CEM II/B-L, que também é um cimento Portland composto com *filer* calcário, classe 32,5 N.

Tabela 6: Análise química e física dos cimentos utilizados na pesquisa

ANÁLISE QUÍMICA	CP II-F	CEM II/B-L
CaO	60,85 %	59,30 %
SiO₂	18,60 %	19,7 %
MgO	4,51 %	1,15 %
Al₂O₃	4,39 %	3,75 %
SO₃	2,79 %	3,10 %
Fe₂O₃	2,63 %	1,79 %
Resíduo insolúvel	1,28 %	1,05 %
CaO Livre	0,79 %	0,69 %
Perda ao fogo	4,62 %	6,47 %
ANÁLISE FÍSICA e MECÂNICA	CP II-F	CEM II/B-L
Início de pega	221 min	140 min
Fim de pega	261 min	180 min
Resistência à compressão (1 dia)	14,0 MPa	7,0 MPa
Resistência à compressão (3 dias)	28,0 MPa	17 MPa
Resistência à compressão (7 dias)	34,1 MPa	28 MPa
Resistência à compressão (28 dias)	41,8 MPa	40,0 MPa
Blaine	3211 cm ² /g	4600 cm ² /g
Massa específica	3,11 g/cm ³	3,10 g/cm ³

Uma estimativa da composição mineral do clínquer do cimento foi calculada de acordo com a fórmula de Bogue (ASTM C 150, 2016), Equação 18 a Equação 21. Conforme a Tabela 7 as fases silicato (C₃S e C₂S) e as fases intersticiais (C₃A e C₄AF) ocupam 68,5 e 15,2 %, em massa, do clínquer do cimento CP II-F, respectivamente. Enquanto que para o CEM II/B-L as fases silicatos ocupam 69,3 % e as fases intersticiais 12,1 %.

$$C_2S = (2,867 \times \% SiO_2) - (0,7544 \times C_3S) \quad \text{Equação 18}$$

$$C_3S = (4,071 \times \% CaO) - (7,600 \times \% SiO_2) - (6,718 \times Al_2O_3) - (1,430 \times \% Fe_2O_3) - (2,852 \times \% SO_3) \quad \text{Equação 19}$$

$$C_3A = (2,650 \times \% Al_2O_3) - (1,692 \times \% Fe_2O_3) \quad \text{Equação 20}$$

$$C_4AF = (3,043 \times \% Fe_2O_3) \quad \text{Equação 21}$$

Tabela 7: Composição mineral do clínquer pela fórmula de Bogue.

	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF
CP II F	61,93 %	6,60 %	7,18 %	8,00 %
CEM II	52,29 %	17,03 %	6,91 %	5,45 %

4.1.3 Agregados

Nesse estudo foram utilizados três tipos de agregados: agregado natural, agregado reciclado de RCC e agregado leve. A análise química do agregado reciclado e leve encontra-se na Tabela 8. Na primeira parte da pesquisa, realizada no Brasil, foram usados os seguintes materiais:

O agregado natural (AN) foi a areia padrão do Instituto de Pesquisa Tecnológico para evitar variações adversas, obtida na cidade de São Paulo. As frações utilizadas foram 2,4 a 0,15 mm.

O agregado reciclado (RCC) foi doado pela usina de beneficiamento SC Recibras, localizada na cidade de Camboriú, no estado de Santa Catarina, sendo que o agregado era resíduo de concreto de caminhão betoneira. O agregado foi coletado de acordo com a norma NBR 10007. Foi utilizado as frações 2,4 a 0,6 mm.

O agregado leve (ALV) trata-se de uma argila expandida doada pela empresa Cinexpan Indústria e Comércio de Argila Expandida Ltda. localizada no município de Várzea Paulista, no estado de São Paulo. O ALV foi obtido com as mesmas dimensões do RCC (2,4 a 0,6 mm).

Tabela 8: Análise química dos agregados utilizados Brasil.

ANÁLISE QUÍMICA	ALV	RCC
SiO₂	67,86 %	87,53 %
Al₂O₃	14,87 %	Não detectado
Fe₂O₃	9,39 %	0,20 %
K₂O	3,39 %	1,21 %
CaO	2,49 %	0,77 %
SO₃	1,12 %	0,20 %
TiO₂	0,45 %	0,01 %
Perda ao fogo	0,20 %	9,14 %

Já, para a segunda parte da pesquisa, realizada na Espanha, foram utilizados materiais com características semelhantes aos utilizados na primeira parte da pesquisa, assim os seguintes materiais foram usados:

O agregado natural utilizado foi a areia padrão de origem siliciosa, normalizada de acordo com a ISO 679, obtida na cidade de Beckum - Alemanha. As dimensões utilizadas foram de 2,4 a 0,15 mm.

O agregado reciclado era composto por concreto e argamassas, de um trabalho anterior realizado no laboratório MATCAR (materiais de construção e estradas), o qual foi britado para obter as dimensões desejadas (2,4 a 0,6 mm). De acordo com a tese de Fernández (2015), esse agregado apresenta 39 % de pasta de cimento envolta nos grãos do agregado natural e a sua análise química está disposta na Tabela 9.

O agregado leve trata-se de uma argila expandida, da marca Weber (Arlita Leca), o qual também necessitou ser britado para obter as dimensões desejadas (2,4 a 0,6 mm). A análise química fornecida pelo fabricante encontra-se na Tabela 9.

Tabela 9: Análise química dos agregados utilizados Espanha.

ANÁLISE QUÍMICA	ALV	RCC
SiO ₂	58,65 %	5,45 %
Al ₂ O ₃	21,42 %	Não detectado
Fe ₂ O ₃	9,74 %	0,72 %
K ₂ O	5,36 %	0,23 %
CaO	3,14 %	53,06 %
TiO ₂	1,05 %	0,06 %
SO ₃	0,20 %	0,41 %
SrO	0,02 %	0,04 %
Cl ⁻	< 0,1 %	0,025 %
SO ₃	< 0,4 %	0,025 %
S	< 0,2 %	0,023 %
Perda ao fogo	0,13 %	39,51 %

Com base na bibliografia descrita anteriormente, foi definida a substituição parcial de 25 % dos agregados naturais pelo agregado reciclado e em outro momento pelo agregado leve, em volume. O valor de 25 % de agregado natural que foi substituído por agregado poroso (RCC e ALV) foi dividido entre as frações 2,4 mm (8,5 %), 1,2 mm (8,5 %) e 0,6 mm (8 %). Já, as frações inferiores (0,3 e 0,15 mm) não foram substituídas pelo agregado poroso, ou seja, em todos os casos essas frações foram de agregado natural.

4.1.4 Metais pesados

Para a saturação dos agregados com os metais pesados, a partir dos quais foram contaminadas as argamassas, foram utilizados sais solúveis de: cromo hexavalente (Cr⁶⁺), chumbo tetravalente (Pb⁴⁺) e zinco bivalente (Zn²⁺), sendo que as fórmulas químicas dos sais são, respectivamente, cromato de sódio (Na₂CrO₄.4H₂O), nitrato de chumbo (Pb(NO₃)₂) e nitrato de zinco (Zn(NO₃)₂.6H₂O).

Os metais pesados foram adicionados nas argamassas em concentrações de 100 e 300 ppm. Essas concentrações foram definidas com base na bibliografia, uma vez que os autores comentam que quando utilizado o processo de S/E não há liberação dos metais pesados da matriz cimentícia para a natureza em proporções maiores que estas

(WEITZMAN, 1990; HEKAL *et al.*, 2011). Bem como, de acordo com Ojovan e Lee (2014), a ocorrência natural média dos elementos na natureza, de nenhum dos metais estudados, é superior a 200 ppm.

4.1.5 Resíduo de galvanoplastia

O resíduo do processo de galvanoplastia foi doado pela empresa Cromados Barba e Garcia, localizada na cidade de Barcelona na Espanha. O resíduo é oriundo de três processos: cromagem, niquelagem e cobreagem.

4.1.6 Preparo das argamassas

Antes do preparo das argamassas foi caracterizado cada fração dos agregados, perante as características físicas, para então realizar o cálculo da substituição volumétrica, com auxílio da Equação 22.

$$m_{agregaddeve} = m_{areia} \times \frac{\gamma_{agregaddeve}}{\gamma_{areia}} \times \% \text{ substituição} \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

m = massa (g);

γ = massa específica (g/cm³).

A saturação dos agregados com água destilada, com a solução de água destilada com metal pesado (em forma de sal solúvel) ou com o resíduo de galvanoplastia, foi realizada por um período de 24 horas antes do preparo da argamassa, em um recipiente hermeticamente fechado (para evitar a perda de umidade por evaporação), esse período foi determinado com base nos resultados da saturação prévia do material e nos resultados obtidos no trabalho de Jochem (2012). A quantidade de água necessária para saturar o agregado foi determinada pelo produto entre a quantidade de agregado e a porcentagem de absorção dos grãos. Nas argamassas preparadas com o agregado seco previamente, o metal ou o resíduo de galvanoplastia foram adicionados na água de amassamento.

As misturas das argamassas foram realizadas em misturador mecânico com rotação planetária. A sequência para a realização das argamassas está descrita a seguir:

- Os materiais secos foram misturados previamente;
- Em seguida foi adicionada água e misturado mecanicamente em velocidade baixa por um minuto;

- Após, foi realizada a mistura na velocidade alta por mais um minuto, deixando a mistura descansar por trinta segundos;
- Após esse tempo, com uma espátula deslocou-se o material segregado das laterais da cuba para o interior da mesma, com um pano úmido sob a cuba da argamassadeira foi deixado à mistura descansar por mais trinta segundos;
- Para finalizar, foi ligada a argamassadeira por mais um minuto em velocidade alta.

Imediatamente após o preparo das argamassas foram realizados os seguintes ensaios no estado fresco: índice de consistência e calor de hidratação. Para os ensaios no estado endurecido, foram moldados os corpos de provas: prismáticos em duas camadas com trinta quedas em cada camada através da mesa de adensamento (NBR 13279/ 2005); e cilíndricos em quatro camadas, recebendo trinta golpes em cada camada com o auxílio de um soquete (NBR 7215/ 1996). Durante as primeiras 24 horas, os corpos de prova ficaram com a base superior protegida com uma plaqueta de vidro para evitar a evaporação da água da argamassa. Passado esse período, foi realizada a desmoldagem dos corpos de prova, que foram revestidos com filme plástico parafinado seguido de papel alumínio, para evitar trocas gasosas e líquidas com o meio externo, mantendo os corpos de prova assim preparados em um ambiente com temperatura e umidade relativa controlada até a idade de cada ensaio.

Foram moldados para cada composição 15 amostras prismáticas (4 x 4 x 16 cm) para ensaios de resistência mecânica; 5 amostras cilíndricas (5 x 10 cm) sendo 2 para o ensaio de tanque (lixiviação), 1 para o ensaio de permeabilidade ao vapor, 2 para o ensaio de absorção por capilaridade e para o ensaio de absorção por imersão e 2 corpos de prova prismáticos de 25 x 25 x 285 mm para o ensaio de retração na barra. Os ensaios de resistência mecânica foram realizados em diferentes intervalos de tempo (1, 3, 7, 28 e 90 dias, em cada idade foram ensaiadas 3 amostras) para verificar em qual período (inicial, médio ou tardio) o agregado reciclado libera a água para a hidratação da matriz e monitorar o efeito das alterações na composição mineralógica do produto final, com o aumento do tempo. Os ensaios de MEV, DRX, RMN, lixiviação (NBR 10005), solubilização, dependência do pH e conformidade foram realizadas com os fragmentos dos corpos de provas prismáticos após os ensaios mecânicos aos 28 dias.

4.1.6.1 Estudo das argamassas com incorporação de metal pesado (material sintético)

Para a primeira parte da pesquisa (etapas metodológicas 02 e 03) foi definida a relação água/ cimento (a/c) 0,5 para todas as argamassas, sendo que a quantidade de água utilizada para saturar os agregados previamente foi descontada da relação a/c total. Assim, a relação a/c efetiva (ou seja, a quantidade de água utilizada descontando a absorção do agregado) foi de 0,38 para as argamassas com agregado reciclado e 0,37 para as argamassas com agregado leve. O traço utilizado nas argamassas também foi constante, 1:3 (cimento: agregado miúdo, em massa), na parte do agregado dividiu-se entre o agregado natural e o agregado leve ou agregado reciclado, sendo 75 % agregado natural e 25 % agregado leve ou reciclado, esse valor foi estipulado com base em estudos de outros autores que concluíram ser essa a quantidade ideal de agregado para auxiliar na cura interna (HOFF, 2002; HENKENSIEFKEN *et al.*, 2009; MEDINA, FRÍAS e ROJAS, 2014). Já, o traço definido foi baseado no trabalho de autores que estudaram o processo de encapsulamento do metal, o agregado leve ou o agregado reciclado (LASHERAS-ZUBIATE *et al.*, 2012; GOLLMANN, 2013; JIMÉNEZ *et al.*, 2013).

Foram produzidas 29 composições diferentes, em algumas argamassas realizou-se a saturação prévia do agregado e em outras não (para verificar a eficiência da cura interna nos diferentes modos de preparo), as argamassas de referência foram confeccionadas sem a adição de metal, conforme Tabela 10.

Tabela 10: Argamassas a serem confeccionadas.

	Material/ Argamassas	Teor de metal (ppm)	Estado prévio do RCC ou ALV	Ma- terial	Metal pesado?			
	AN	0	Seco	AN	Sem metal			
	REF	0			Sem metal			
RCC + AN	Pb 100 ppm	100	Seco	AN + RCC	Amostras com metal			
	Cr 100 ppm							
	Zn 100 ppm							
	Pb 300 ppm	300						
	Cr 300 ppm							
	Zn 300 ppm							
	REF + SAT					0		Sem metal
Pb 100 ppm + SAT	100	Saturado	AN + RCC	Amostras com metal				
Cr 100 ppm + SAT								
Zn 100 ppm + SAT								
Pb 300 ppm + SAT								
Cr 300 ppm + SAT	300							
Zn 300 ppm + SAT								
ALV + AN	REF				0			Sem metal
	Pb 100 ppm	100	Seco	AN + ALV	Amostras com metal			
	Cr 100 ppm							
	Zn 100 ppm							
	Pb 300 ppm	300						
	Cr 300 ppm							
	Zn 300 ppm							
	REF + SAT					0		Sem metal
	Pb 100 ppm + SAT	100				Saturado	AN + RCC	Amostras com metal
	Cr 100 ppm + SAT							
	Zn 100 ppm + SAT							
Pb 300 ppm + SAT								
Cr 300 ppm + SAT	300							
Zn 300 ppm + SAT								

Nota: REF = referência; AN = areia natural; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = nitrato de chumbo; Cr = cromato de sódio; Zn = nitrato de zinco.

4.1.6.2 Estudo da solidificação do resíduo de galvanoplastia – caso real

Na segunda parte da pesquisa (etapas metodológicas 05 e 06), produziu-se 26 composições distintas. Na Tabela 11 têm-se as diferentes composições das argamassas com e sem a presença de resíduo de galvanoplastia (no estado líquido). As 13 composições mostradas na tabela, foram produzidas em dois traços diferentes, 1: 3 e 1: 2,5 (cimento: agregado miúdo, em massa). A parte do agregado foi dividida entre o agregado natural e o agregado leve ou agregado reciclado, sendo 75 % agre-

gado natural e 25 % agregado leve ou reciclado. Em todas as 26 composições utilizou-se a mesma relação a/c (0,42). Sendo a relação a/c efetiva de 0,39 para as argamassas com agregado reciclado e 0,29 para as argamassas com agregado leve. Nas argamassas produzidas com agregado leve utilizou-se 0,5 % de aditivo superplastificante (Glenium Sky 549 da marca Basf) em relação à massa total de cimento.

Tabela 11: Argamassas a serem preparadas com incorporação do lodo.

Material/ Argamassas	Teor de lodo* (%)	Estado prévio do RCC ou ALV	Material	Metal pesado?
REF-AN		Seco	AN	
REF-ALV		Seco		
ALV + SAT	0	Saturado	AN + ALV	Amostras sem metal
REF-RCC		Seco		
RCC + SAT		Saturado	AN + RCC	
AN + LODO		Seco	AN	
ALV + LODO		Seco		
ALV+ LODO+ SAT	8,5	Saturado	AN + ALV	Amostras com metal
RCC + LODO		Seco		
RCC+ LODO+ SAT		Saturado	AN + RCC	
AN + LODO			AN	Amostras
ALV + LODO	100	Seco	AN + ALV	com
RCC + LODO			AN + RCC	metal

Nota: REF = referência; AN = areia natural; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; LODO = resíduo de galvanoplastia;

* teor de lodo em relação ao teor total de água de amassamento na amostra.

4.2 MÉTODOS E TÉCNICAS ANALÍTICAS

A seguir estão descritos todos os métodos e técnicas analíticas utilizadas para caracterização dos agregados e argamassas.

4.2.1 Análises estatísticas

Nos resultados dos ensaios de resistência mecânica, absorção por imersão e porosidade aberta foi realizada análise de variância de dois fatores - ANOVA para determinar se a cura interna, os agregados, os metais pesados, o teor de metais e/ou o resíduo de galvanoplastia tiveram efeito estatisticamente significativo nessas propriedades do estado endurecido. O teste F na análise ANOVA determina se existem diferenças significativas entre os valores médios dos resultados das propriedades analisadas. Se o $F\alpha$ -valor do F-teste foi inferior a 0,05, teve efeito significativo sobre a propriedade analisada ao nível de confiança de

95%. Por outro lado, se o F_a -valor foi maior do que 0,05, não apresentou um efeito significativo.

4.2.2 Caracterização das matérias-primas

Os ensaios de massa específica (NBR NM 52/ 2009), massa unitária e volume de vazios (NBR NM 45/ 2006) dos agregados foram realizados de acordo com a norma vigente. Já, para os ensaios que não possuem ou não foram realizados de acordo com normas brasileiras estão descritos nos itens subsequentes. Sendo, que os ensaios de solubilização, lixiviação (NBR 10005), MEV, DRX e EDX realizado nos agregados, estão descritos no item de caracterização das argamassas (item 4.2.3 a seguir).

4.2.2.1 Absorção granular por imersão

O ensaio de absorção granular por imersão consiste em colocar uma quantidade determinada de material seco em estufa (105 ± 5 °C por 48 horas) dentro de um copo de Becker submerso em água e deixar em repouso por um período de 24 e 48 horas. Após cada período de tempo determinado, retirou-se o excesso da água superficial do material com o auxílio da bomba de vácuo, em seguida pesou-se e colocou-se o material na estufa a 105 ± 5 °C até a sua constância de massa (sem variação de massa entre duas medidas consecutivas). Com os valores de massa seca e úmida dos agregados calculou-se a absorção por imersão pela média de três amostras, com o auxílio da Equação 23:

$$Abs = \left(\frac{m_h - m_s}{m_s} \right) \times 100 \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

Abs = absorção granular (%);

m_h = massa úmida (g);

m_s = massa seca (g).

4.2.2.2 Isotermas de adsorção

O ensaio de isoterma de adsorção foi realizado nos grãos do agregado com dimensão entre 2,4 e 0,6 mm. Para o ensaio, as amostras permaneceram 24 horas em estufa a 105 ± 5 °C, em seguida, pesou-se as amostras para determinar o peso inicial (em torno de 1 grama) e então

foram colocadas na parte superior do dessecador, visto que na parte inferior foi colocado à solução salina saturada. A quantidade de água adsorvida para diferentes valores de umidade relativa no estado de equilíbrio foi obtida através do método gravimétrico. O tempo necessário para alcançar o estado de equilíbrio nas amostras dependeu da espessura e da faixa de umidade relativa. O ensaio foi realizado em duplicata.

Para a realização do ensaio foram utilizados seis diferentes sais: hidróxido de potássio (KOH), cloreto de magnésio ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$), bicromato de sódio ($Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$), nitrito de sódio ($NaNO_2$), cloreto de sódio (NaCl) e sulfato de potássio (K_2SO_4). Esses sais a uma temperatura de 50 °C fornecem, respectivamente, os seguintes valores de umidade relativa: 6, 31, 47, 65, 75 e 96 % (ROCKLAND, 1960).

Para descrever o comportamento das isotermas de adsorção, a partir dos dados do ensaio experimental, utilizou-se o modelo matemático de GAB. O ajuste dos parâmetros do modelo foi realizado por regressão não linear, com o auxílio do programa Labfit (2011). A Equação 24 descreve o modelo de GAB. Com os resultados de umidade de equilíbrio (W) foram confeccionados os gráficos.

$$W = \frac{W_m \times C \times K \times a_w}{\left[(1 - K \times a_w) \times (1 + (C - 1) \times K \times a_w) \right]} \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

W = umidade de equilíbrio ($kg \text{ H}_2\text{O} \cdot (kg^{-1} \text{ sólido seco})$);

W_m = teor de umidade na monocamada molecular ($kg \text{ H}_2\text{O} \cdot (kg^{-1} \text{ sólido seco})$);

C = constante de GAB;

a_w = atividade da água (adimensional);

K = constante relacionada ao calor de sorção das múltiplas camadas, acima da monocamada de água nas isotermas de GAB.

4.2.2.3 Isotermas de dessecção

O ensaio de isoterma de dessecção descreve a perda de água a partir dos poros dos agregados durante a secagem. Foi realizado nos grãos com dimensões entre 2,4 e 0,6 mm, pois grãos com tamanho inferior a esses não são eficazes para a cura interna.

Utilizou-se os mesmos dessecadores do ensaio de isotermas de adsorção, com as mesmas soluções salinas e na mesma temperatura de 50 °C. A única diferença do ensaio de isoterma de adsorção foi à condição inicial das amostras. As amostras foram fervidas por um período de 5 minutos, em seguida, foram deixadas submersas em água por 7 dias.

Para o início do ensaio as amostras foram secas superficialmente, pesadas, colocadas no porta amostra e, então nos dessecadores. Aferiu-se a massa das amostras todos os dias até constância de massa. O ensaio realizou-se em duplicata.

Para descrever o comportamento das isotermas de dessecção, a partir dos dados do ensaio experimental, utilizou-se o modelo matemático de GAB, conforme descrito no item 4.2.2.2.

4.2.2.4 Ataque ácido

O ensaio foi realizado apenas no agregado reciclado e consistiu em separar uma quantidade determinada de cada uma das frações (seca em estufa a 105 ± 5 °C) em copos de erlenmeyer e adicionar ácido clorídrico e água. Com o auxílio de um bastão de vidro agitou-se a amostra e em seguida os copos de erlenmeyer foram tampados com papel alumínio. Passado um período de 24 horas, as frações do agregado reciclado foram lavadas e passadas na peneira 0,075 mm e colocadas na estufa a 105 ± 5 °C. Após 24 horas, as amostras foram pesadas e repetiu-se o procedimento com o ácido, para verificar se toda a pasta de cimento já havia sido consumida. Esse ensaio foi realizado em duplicata. Em seguida, com o auxílio da Equação 25 determinou-se o teor de pasta de cimento presente em cada fração do agregado.

$$\text{Teor de pasta} = \frac{m_i \times m_f}{m_i} \times 100 \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

M_i = massa inicial antes do ataque ácido (g);

M_f = massa final após ataque ácido (g).

4.2.2.5 Perda ao fogo

O ensaio de perda ao fogo foi realizado no resíduo de galvanoplastia e no cimento Portland para determinar a perda de massa durante a queima ao forno. O ensaio consiste em colocar a amostra (seca em estufa a 100 °C) no cadinho de porcelana em uma mufla, a temperatura de 1000 °C, por um período de 1 hora. Passado o tempo determinado, retirou-se a amostra da mufla e colocou-se em um dessecador até resfriar, para então ser pesada novamente. O ensaio foi realizado em triplicata. De acordo com a Equação 26 foi determinado à perda de massa ao fogo (Pf).

$$Pf = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad \text{Equação 26}$$

Onde:

M_i = massa inicial antes da mufla (g);

M_f = massa final após mufla (g).

4.2.2.6 Sorção dos agregados

Realizou-se o ensaio de sorção dos grãos na curva granulométrica dos agregados porosos (agregado leve e agregado reciclado) baseado no procedimento descrito no trabalho de Coleman, Lee e Slipper (2005).

O ensaio consistiu em colocar os grãos em contato com uma solução de água destilada com 300 ppm do metal em questão (cromo, zinco e chumbo). Essa solução foi colocada em agitação no agitador magnético por 5 minutos, em seguida adicionou-se o agregado e foi deixado em repouso por 24 horas. Após o tempo determinado, verificou-se o pH e a condutividade elétrica da amostra e filtrou-se a solução para realizar a análise química e determinar quanto dos 300 ppm adicionados ficaram retido nos agregados. Após a amostra ser filtrada, recuperou-se todo o agregado e realizou-se o ensaio de conformidade (citado no item 4.2.3.8.4), para determinar a lixiviação e a retenção do metal pelo agregado.

4.2.2.7 Ataque por água régia

O ensaio de ataque por água régia foi realizado para determinar os teores dos metais pesados presentes no resíduo de galvanoplastia. O ensaio consistiu em secar o resíduo em estufa a 100 °C, durante 24 horas. Em seguida, o resíduo foi moído e peneirado até atingir uma dimensão inferior a 0,063 mm. Em um copo de Becker colocou-se 3 gramas do resíduo moído e adicionou-se gotas de água destilada, 21 ml de ácido clorídrico (HCl) e 7 ml de ácido nítrico (HNO₃), agitou-se essa mistura e deixou-a em repouso por 16 horas. Após esse período, a mistura foi aquecida a 50 °C por 2 horas. Em seguida, essa mistura foi filtrada e adicionou-se HNO₃ 0,5 N até completar 100 ml de solução. Filtrou-se essa mistura com o HNO₃ 0,5N e, então, analisou-se por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), modelo Optima 8300 da marca Perkin Elmer.

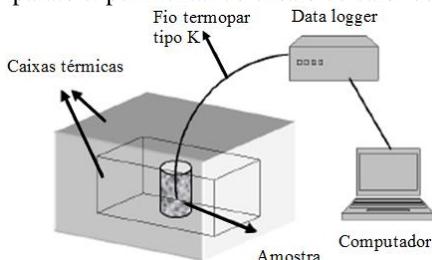
4.2.3 Caracterização das argamassas

Os seguintes ensaios foram realizados para a caracterização das argamassas produzidas neste estudo (etapas metodológicas 02, 03, 05 e 06). A realização dos ensaios de resistência mecânica (NBR 13279/2005), absorção de água e índice de vazios (NBR 9778/2005) foram realizados de acordo com a norma vigente. Já, para os demais procedimentos e técnicas analíticas encontram-se descritos nos itens subsequentes.

4.2.3.1 Calor de hidratação

A hidratação do cimento é um processo exotérmico e a observação da liberação de calor fornece informações sobre a cinética de hidratação de cada constituinte do cimento. O ensaio de calorimetria semi-adiabática foi realizado nas argamassas no estado fresco, logo após o término do preparo da mesma. O ensaio consiste em colocar uma quantidade determinada de argamassa em um recipiente cilíndrico de poliestireno (12 cm de altura por 7 cm de diâmetro) com um termopar no centro do corpo de prova, o recipiente cilíndrico foi revestido com manta térmica e colocado dentro de duas caixas térmicas. No ensaio foram captadas as alterações da temperatura pelo *data logger* acoplado no computador, com leituras a cada 20 segundos até 24 horas (Figura 9).

Figura 9: Aparato experimental do ensaio de calor de hidratação



Fonte: Andrade, 2008.

Com o ensaio foi verificada a influência do metal na formação dos produtos hidratados e no grau de hidratação; e a influência da água adicional disponível dentro dos reservatórios internos. Para a determinação do grau de hidratação das argamassas foram utilizadas as Equações 27 a 29.

$$\alpha = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{\Sigma(m_i \times Q_c)} \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 27}$$

$$Q_{m\acute{a}x} = \Sigma Q_i \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 28}$$

$$Q_i = \frac{C_s \times \Delta T_i}{m_c} \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 29}$$

Onde:

α = grau de hidrata\c{c}\~{a}o (%);

$Q_{m\acute{a}x}$ = calor total gerado (J/g);

m_i = quantidade dos compostos do cimento Portland, calculado pela f\~{o}rmula de Bogue (%);

Q_c = calor de hidrata\c{c}\~{a}o dos compostos separados quando hidratados totalmente (J/g);

Q_i = quantidade de calor gerado no tempo i (J/g);

C_s = capacidade t\~{e}rmica da amostra (J/K);

ΔT_i = varia\c{c}\~{a}o da temperatura no tempo i ($^{\circ}$ C);

m_c = massa de cimento na amostra (g).

4.2.3.2 Varia\c{c}\~{a}o dimensional

O ensaio foi realizado conforme a NBR 15261 (2005). Foram moldados 2 corpos de prova prism\~{a}ticos de 25 x 25 x 285 mm para cada amostra. Ap\~{o}s 24 horas foi realizado a desmoldagem, os corpos de prova foram revestidos com filme pl\~{a}stico parafinado seguido de papel alum\~{i}nio, para evitar trocas gasosas e l\~{i}quidas com o meio externo, e mantidos durante os 120 dias do ensaio em um ambiente com temperatura (23 ± 2 $^{\circ}$ C) e UR (50 ± 5 %) controlada. As leituras foram realizadas com 1, 2, 3, 7, 14, 21, 28, 42, 56, 90 e 120 dias. O ensaio consistiu em medir a varia\c{c}\~{a}o longitudinal dos corpos de prova, para isso o mesmo \u00e9 colocado verticalmente no aparato do ensaio, no qual h\~{a} um rel\~{o}gio comparador (com precis\~{a}o de 0,001 mm, fabricado pela Sylvac, modelo S 229). Todos os corpos de prova foram medidos na mesma posi\c{c}\~{a}o para evitar vari\~{a}veis que pudessem influenciar na leitura, bem como foram aferidas uma medida para cada face da amostra, ou seja, para cada amostra foi realizada a m\~{e}dia de 4 medidas e ap\~{o}s a m\~{e}dia dos 2 corpos de prova. A varia\c{c}\~{a}o dimensional foi determinada pela Equa\c{c}\~{a}o 30.

$$\varepsilon = \frac{L_i - L_o}{D} \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 30}$$

Onde:

ε = medida da variação dimensional em um dado tempo (mm/m);

L_i = leitura efetuada em um dado tempo (mm);

L_o = leitura efetuada após a desforma (mm);

D = distância livre entre os pinos (0,25 m).

4.2.3.3 Absorção de água por capilaridade

O ensaio foi realizado nos corpos de prova cilíndricos (5 x 10 cm) aos 28 dias, a fim de verificar a absorção capilar, o ângulo de molhamento e a sorptividade das argamassas, assim como estimar a porosidade e a permeabilidade. Uma vez que, quanto mais rápida for a absorção, a argamassa apresentará poros maiores, permeáveis e interconectados, o oposto da absorção lenta.

O procedimento desse ensaio, realizado pelo laboratório ValoRes, consiste na medida da variação da altura da coluna de água, em um tubo de Mariotte graduado, em tempos pré-estabelecidos durante um período de 24 horas, sendo a variação da altura diretamente proporcional à quantidade de água absorvida pela amostra (Figura 10).

Figura 10: Ensaio de absorção de água por capilaridade.



Inicialmente, secou-se as amostras em estufa a 50 ± 2 °C, para evitar a evaporação da água pelas superfícies da amostra as faces laterais foram protegidas com filme de PVC. Após a realização do ensaio com água destilada, as amostras foram pesadas e colocadas em estufa a 50 ± 2 °C até constância de massa, para a verificação da massa seca. Em seguida, com a amostra seca, repetiu-se o ensaio com alteração da água por álcool etílico. A substituição do líquido ocorre, pois o álcool é considerado um líquido perfeitamente molhante, ou seja, o ângulo de molhamento é nulo em função do menisco capilar ser bastante curvo. Com a realização do ensaio com água e álcool determinou-se o ângulo de molhamento aparente das argamassas com o auxílio da Equação 31.

$$\cos \alpha = \left(\frac{S_a}{S_{al}} \right)^2 \times \frac{\mu_a \times \sigma_{al}}{\mu_{al} \times \sigma_a} \quad \text{Equação 31}$$

Onde:

α = ângulo de molhamento aparente;

μ_a = viscosidade dinâmica da água (1,005 centipoise);

μ_{al} = viscosidade dinâmica do álcool (1,200 centipoise);

σ_a = tensão superficial água-ar (72,75 dynes/cm);

σ_{al} = tensão superficial álcool-ar (23,04 dynes/cm);

S_a = inclinação da reta que relaciona o estoque de água infiltrado com a raiz do tempo;

S_{al} = inclinação da reta que relaciona o estoque de álcool infiltrado com a raiz do tempo (MEROUANI, 1987).

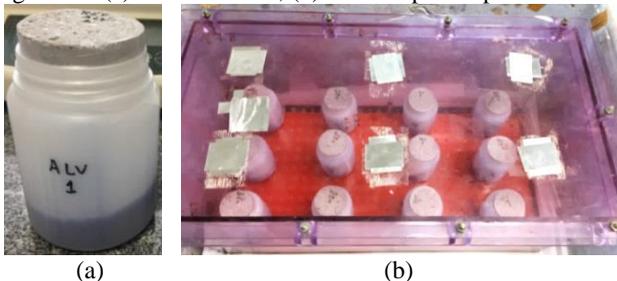
Com os dados obtidos no ensaio determinou-se, também, o coeficiente de absorção ou sorptividade (inclinação da reta no gráfico: índice de absorção *versus* raiz do tempo).

4.2.3.4 Permeabilidade ao vapor

O ensaio de permeabilidade ao vapor foi baseado na pesquisa de Jansen (2007). Para a realização do ensaio utilizou-se uma caixa de acrílico estanque com uma grade a 5 cm do fundo. Na parte de cima da grade colocou-se os portas amostras e na parte de baixo a solução salina de Bicromato de sódio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), a qual gerou uma umidade relativa de 47%. O porta amostra foi preparado de tal modo que a amostra fosse a única fronteira permeável entre o seu interior e a região externa. No interior do porta amostra colocou-se sílica gel para que a umidade fosse praticamente nula. Com isso, a amostra se tornou a única barreira entre duas regiões com umidade relativas diferentes, sendo a migração de umidade através dos poros da amostra. A fim de evitar variações de temperatura, a caixa de acrílico com o porta amostra foi colocada dentro de uma caixa de isopor (Figura 11-a,b).

Na Figura 11-c está representado o esquema de como ocorre à migração de umidade no interior da câmara através da amostra porosa seca a 50 °C. Para acompanhar a evolução da migração de umidade, o conjunto porta amostra e corpo de prova tinham sua massa aferida diariamente. A temperatura do ensaio foi de 25°C.

Figura 11: (a) Porta amostra; (b) Câmara pronta para o ensaio.



A partir da evolução de massa da amostra, a permeabilidade pode ser calculada, utilizando a Equação 32 e Equação 33.

$$J_V = \frac{\left(\frac{f_V}{t}\right)}{A} \quad \text{Equação 32}$$

$$k_V = \frac{J_V \times e}{P_{V2} - P_{V1}} \quad \text{Equação 33}$$

Onde:

J_V = Densidade do fluxo de vapor (kg/s.m²);

f_V = Fluxo de vapor (kg);

t = tempo (s);

A = Área da amostra (m²);

k_V = Permeabilidade ao vapor (kg/s.m.Pa);

e = espessura (m);

$P_{V2} > P_{V1}$ = Pressões parciais diferentes dos vapores (Pa).

4.2.3.5 Microscopia eletrônica de varredura

A técnica foi aplicada nos fragmentos dos corpos de prova com 3 e 28 dias (após o ensaio de resistência mecânica as amostras foram quebradas em fragmentos e submergidas por 24 horas em acetona, e em seguida ficaram mais 24 horas em estufa a 50 ± 2 °C). Para a realização do ensaio, as amostras foram recobertas por uma camada de ouro. O equipamento utilizado é da marca JEOL modelo JSM-6390LV, situado no laboratório central de microscopia eletrônica (LCME) da UFSC.

A técnica consiste em incidir sobre a superfície da amostra um feixe de elétrons de alta energia, esse feixe é reemitido e detectado por sensores dentro do microscópio. Assim, parte do feixe é refletido e convertido em imagem de elétrons retro espalhados. O equipamento tam-

bém é equipado com espectroscopia por dispersão de energia de raios-X (EDS) o qual forneceu a composição química dos elementos da amostra.

4.2.3.6 Ressonância magnética nuclear

Os produtos hidratados formados pela incorporação dos metais pesados e pela realização da cura interna foram estudados pela técnica de Ressonância Magnética Nuclear de sólidos, ^{29}Si RMN. Esta técnica é extremamente útil para estudar a microestrutura das espécies sólidas no caso de materiais heterogêneos. Registrou-se os espectros de ^{29}Si RMN em um espectrômetro da marca Bruker, modelo AMX-300 equipado com um acessório de polarização cruzada/ ângulo mágico de rotação (CP/MAS) a uma temperatura de 25 °C.

Para cada ensaio, utilizou-se entre 200 e 300 mg de amostra (inferior a 0,063 mm), introduzida e compactada em um rotor cerâmico de óxido de zircônio de 7 mm e coberta com um tampão de Kel-F (polietileno). Os espectros de ^{29}Si foram obtidos por radiação numa frequência de 59,63 MHz com uma largura espectral de 31250 Hz e 4096 pontos. Realizaram-se entre 6000 e 7000 aquisições sem desacoplamento de ^1H . A polarização cruzada a partir do núcleo de ^1H para ^{29}Si foi usada para aumentar a sensibilidade. Uma vez que, de acordo com Justnes *et al.*, (1990) a polarização cruzada de ^{29}Si com ^1H no cimento parcialmente hidratado reforça os sinais de silício com grupos hidroxilos como vizinhos. O tempo de espera entre cada pulso foi de 3 segundos.

Essa técnica se baseia no giro da amostra sólida, em seu eixo, a frequências elevadas no interior de uma sonda, a 54° 44' (ângulo mágico de rotação) com relação ao B_0 (campo magnético do espectrômetro), fazendo desaparecer o acoplamento dipolar e produzindo um estreitamento das bandas.

4.2.3.7 Difratometria de raios-X

A análise de difratometria de raios-X (DRX) foi realizada para identificar os minerais presentes no resíduo de galvanoplastia seco em estufa a 100 °C, nas argamassas e nos agregados. Para a realização do ensaio, as amostras foram moídas e peneiradas até o tamanho inferior a 0,063 mm, para minimizar a interferência ocasionada pelo agregado miúdo. Conforme a amostra foi moída, foram retirados todos os agregados naturais possíveis.

A análise consiste em colocar a amostra no equipamento e aplicar um feixe de raios-X, a partir da medida do ângulo de difração do feixe

que atinge a rede cristalina dos átomos foram determinadas as fases cristalinas. A análise foi realizada em um equipamento da marca Bruker, modelo D8 Venture, operando nas seguintes condições: radiação de Cobre; comprimento de onda 1,54, localizado no raio $K\alpha$; intervalo de análise de 2θ variando de 4° à 80° , com um passo de $0,017^\circ$; feixe incidente monocromador; e temperatura de 25°C .

4.2.3.8 Lixiviação

4.2.3.8.1 Ensaio de tanque

O ensaio de tanque foi realizado para verificar o potencial e a velocidade de lixiviação nas argamassas no estado endurecido ao longo do tempo, baseado na norma EA NEN 7375 (2004).

O ensaio consiste em colocar a amostra cilíndrica (com 28 dias de cura) submersa em água destilada e deionizada em um tanque de acrílico estanque, com relação líquido/ sólido (L/S) igual a 5. Foram realizadas 8 etapas de extração/ renovação do líquido lixiviante, após 6, 24 e 54 horas, 4, 9, 16, 36 e 64 dias de imersão da amostra. A cada extração, filtrou-se o líquido com o auxílio da bomba de vácuo e, em seguida, verificou-se a condutividade elétrica, pH e a análise química (com o EDX - Brasil e com ICP-MS - Espanha) para identificar os elementos químicos presentes no líquido lixiviado.

Com o ensaio foi calculado pela Equação 9 (citada anteriormente), o coeficiente de difusão e estimado a difusividade e a mobilidade dos contaminantes presentes nas argamassas, segundo a EA NEN 7375.

4.2.3.8.2 Lixiviação

Realizou-se o ensaio de acordo com a NBR 10005 (2004), que se baseia na norma americana US EPA *Method 1311* (2001) TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*). Com o ensaio determinou-se o teor máximo liberado dos metais presentes nas matrizes cimentícias.

Para a realização desse ensaio, utilizou-se fragmentos granulares das argamassas no estado endurecido com dimensão inferior a 9,5 mm aos 28 dias. Primeiramente, determinou-se a solução de extração utilizada conforme detalhado na norma NBR 10005. Em todas as argamassas, utilizou-se a solução de extração preparada com 5,7 ml de ácido acético glacial e completou-se o volume com água deionizada até 1 litro, o pH desta solução foi de $2,88 \pm 0,05$. Após a definição da solução de extração pesou-se 25 gramas da amostra e colocou-se dentro do recipiente

cilíndrico do ensaio com 500 ml da solução (relação L/S = 20). Posteriormente, o recipiente cilíndrico fechado foi conectado no agitador rotativo com rotação de 30 ± 2 rpm durante um período de 18 ± 2 horas a 25 °C. Passado o tempo de ensaio, filtrou-se, com o auxílio da bomba de vácuo, a solução com papel filtro de padrão analítico. No líquido filtrado foi aferido o seu pH, condutividade elétrica e análise química pelo EDX.

4.2.3.8.3 Solubilização

O ensaio de solubilização foi realizado de acordo com a NBR 10006 (2004) nos fragmentos (inferior a 9,5 mm) das amostras monolíticas aos 28 dias. O ensaio permitiu analisar os teores de metais pesados solubilizados da amostra.

O ensaio consiste em colocar a amostra em contato com a água destilada e deionizada (com relação L/S igual a 4) em um béquer e agitar por um período de 5 minutos, em baixa rotação. Em seguida, o recipiente foi tampado e deixado em repouso por 7 dias a 25 ± 1 °C. Passado o período em repouso, aferiu-se o pH e filtrou-se a solução. Da solução filtrada, extraiu-se 4 ml para análise de EDX.

4.2.3.8.4 Ensaio de conformidade

O ensaio foi realizado de acordo com a norma europeia EN 12457-4 (2002), com o objetivo de determinar a liberação dos constituintes solúveis em contato com a água, considerado como o principal mecanismo de liberação que resulta em potencial risco para o ambiente durante o reuso ou a disposição dos resíduos. Para a realização desse ensaio, utilizou-se fragmentos granulares das argamassas no estado endurecido com dimensão inferior a 9,5 mm aos 28 dias.

O ensaio consiste em pesar 90 gramas da amostra e colocar em um recipiente cilíndrico com 900 ml de água (relação L/S = 10). Em seguida, o recipiente cilíndrico foi fechado e conectado ao agitador rotativo (rotação de 10 rpm) durante um período de $24 \pm 0,5$ horas, a 20 ± 5 °C. Passado o tempo de ensaio, filtrou-se a solução com papel filtro de padrão analítico, com o auxílio da bomba de vácuo, e aferiu-se o pH, a condutividade elétrica e realizou-se a análise química por ICP-MS.

4.2.3.8.5 Ensaio de dependência do pH

O ensaio de dependência do pH foi baseado no método 1313 de 2012 da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA). O

ensaio é utilizado para avaliar o comportamento do material em diferentes valores de pH. Foi realizado nos fragmentos das argamassas, com diâmetro inferior a 0,3 mm. Cada amostra foi colocada em contato com 9 diferentes valores de pH (2; 4; 5,5; 7; 8; 9; 10,5; 12 e 13). O pH natural da amostra em contato com apenas água destilada foi de 12, assim foi adicionado ácido nítrico ($\text{HNO}_3 - 2\text{N}$) para alcançar os valores de pH abaixo de 12 e hidróxido de potássio ($\text{KOH} - 1\text{N}$) para obter o pH 13.

O ensaio consistiu em pesar uma quantidade determinada da amostra e adicionar água destilada, mantendo a relação $L/S = 10$. Em seguida, foi adicionado ácido ou base na amostra até obter-se cada um dos 9 valores de pH determinados. Após isso, a amostra é colocada em um equipamento de rotação constante ($28 \pm 2 \text{ rpm}$) por um período de 24 horas. Passado esse período, a amostra foi deixada em repouso por 15 minutos, para então verificar-se o pH e a condutividade final, bem como, filtrá-la para realização da análise química no líquido lixiviado.

4.2.3.9 Espectrometria de raios-X por energia dispersiva

A análise de espectrometria de raios-X por energia dispersiva (EDX) é uma análise da composição química semi-quantitativa, realizada para conhecer o teor de metais presentes nas amostras. Foi realizada no líquido extraído após o ensaio de lixiviação (ensaio de tanque e de acordo com a NBR 10005) e solubilização e na amostra de cimento.

Quando utilizado amostra líquida foram analisados 4 ml e na amostra sólida preparou-se uma pastilha com 2 gramas de material e prensou-se com uma carga de 40 MPa. A técnica consistiu em colocar a amostra líquida ou sólida no interior do equipamento (EDX – 700 da marca Shimadzu) e estimular a amostra com sinais de raios-X. Os elementos individuais presentes na amostra emitem raios-X característicos e o equipamento detecta esses raios-X e determina quais elementos estão presentes no material.

4.2.3.10 Espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado

A análise química por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) foi realizada nas amostras do ensaio de conformidade e de lixiviação tanque, realizada na UPC - Espanha. Realizou-se essa análise para determinar a composição química e o teor de metais presentes nas amostras. Para isso, utilizou-se um equipamento da marca Perkin-Elmer, modelo Elan-6000.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

5.1.1 Propriedades físicas dos agregados

As características físicas dos agregados utilizados na pesquisa estão descritos na Tabela 12. A massa específica, a massa unitária e o índice de vazios foram influenciados pela natureza do agregado. Isso era esperado, uma vez que, o agregado leve apresenta maior porosidade em relação aos demais agregados. Entretanto, a porosidade não é muito superior (23 % e 4 % superiores, respectivamente, para a curva do agregado natural e reciclado, em relação ao agregado leve), como quando comparado suas massas específicas e unitárias. Isso ocorre porque o índice de vazios é calculado em relação à massa específica e a massa unitária de cada um dos materiais e a diferença entre as massas é semelhante, sendo a massa unitária em torno da metade do valor da massa específica.

Tabela 12: Propriedades físicas dos agregados utilizados.

	Frações/ Curvas	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Índice de vazios (%)
AN	2,4 mm	2,61	1,19	54,5
	1,2 mm	2,65	1,16	56,1
	0,6 mm	2,67	1,14	57,4
	D/d= 2,4/ 0,15 mm	2,66	1,37	48,5
RCC	2,4 mm	2,56	1,19	53,4
	1,2 mm	2,54	1,16	54,3
	0,6 mm	2,50	1,10	56,1
	D/d= 2,4/ 0,6 mm	2,56	1,11	56,8
ALV	2,4 mm	1,20	0,48	59,9
	1,2 mm	1,24	0,51	59,0
	0,6 mm	1,49	0,58	60,9
	D/d= 2,4/ 0,6 mm	1,33	0,54	59,2

Nota: AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve.

A massa específica e unitária dos agregados naturais e reciclados são semelhantes, com uma leve redução (2 a 6,4 %) da massa específica no agregado reciclado devido à pasta de cimento do concreto antigo aderida aos grãos dos agregados, corroborando com os resultados de Etxeberria, Vázquez e Mari (2007) e Butler, West e Tighe (2011).

5.1.2 Ataque ácido no agregado reciclado

Nas frações do agregado reciclado foi realizado o ensaio de ataque ácido com ácido clorídrico (HCl) para determinar a porcentagem de material cimentício nos grãos do agregado reciclado e os resultados estão descritos na Tabela 13.

Tabela 13: Porcentagem de material cimentício.

Frações	Agregado natural	Pasta aderida
2,4 mm	87,0 %	13,0 %
1,2 mm	83,7 %	16,3 %
0,6 mm	82,1 %	17,9 %

Verificou-se que o maior teor de material cimentício encontra-se na fração 0,6 mm, devido sua maior área superficial (conforme observado no ensaio de isotermas, Tabela 16), corroborando com Juan e Gutiérrez (2009) e Lotfi *et al.* (2015), que verificaram que o teor de pasta de cimento aderido aumenta à medida que o tamanho da fração diminui.

O teor de pasta aderida neste estudo variou de 13 a 18 %, este teor pode ser explicado pelo resíduo ser oriundo de caminhão betoneira, o qual, possivelmente, passou por uma lavagem antes de ser depositado na central de beneficiamento.

De acordo com Juan e Gutiérrez (2009) quando a massa específica do agregado reciclado está em torno de 2,5 a 2,7 g/cm³ o teor de pasta aderida encontra-se entre 8 e 18 %, estando de acordo com o encontrado neste estudo.

Na Tabela 14 são apresentados os resultados de caracterização dos agregados após o ataque ácido (HCl). Comparando-se os valores da caracterização antes (Tabela 12) e após o ataque ácido, nota-se que as massas específicas e unitárias das três frações aumentaram. Já, o índice de vazios diminuiu após o ataque ácido. Pois, toda a argamassa aderida foi consumida pelo ácido e resta apenas agregado natural, que é menos poroso que a argamassa.

Tabela 14: Caracterização do agregado reciclado após ataque ácido.

Frações	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Índice de vazios (%)
2,4 mm	2,59	1,23	52,3
1,2 mm	2,61	1,21	53,6
0,6 mm	2,58	1,15	55,5

5.1.3 Isotermas

As isotermas de adsorção foram desenvolvidas a partir do ajuste do conteúdo de umidade mássico utilizando o modelo matemático de GAB. Os coeficientes do modelo de GAB obtidos por meio de um programa computacional de linearização são apresentados na Tabela 15.

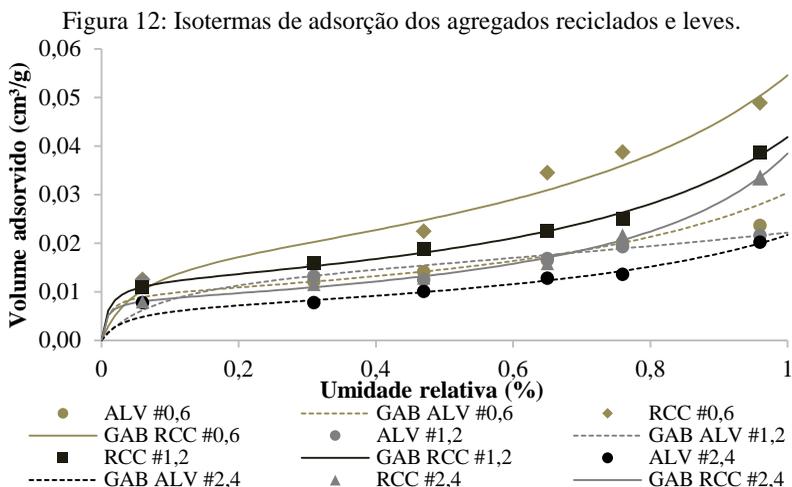
Tabela 15: Coeficientes do modelo de GAB (adsorção).

	Frações	W_m (kg H ₂ O.kg ⁻¹ sólido seco)	K	C
RCC	2,4 mm	0,0084	0,7829	247,2530
	1,2 mm	0,0124	0,7036	132,5359
	0,6 mm	0,0182	0,6718	27,7624
ALV	2,4 mm	0,0080	0,6347	21,5432
	1,2 mm	0,0116	0,5073	53,9600
	0,6 mm	0,0124	0,5231	22,6383

Nota: W_m = conteúdo de umidade na monocamada molecular; K = constante relacionada ao calor de sorção das múltiplas camadas; C = constante de GAB.

Na Figura 12 são apresentados os dados do ensaio experimental e as curvas geradas com os valores ajustados pelo método de GAB. Verifica-se que todas as frações do agregado reciclado e do agregado leve estudadas são do tipo II. Isoterma tipo II é característica de materiais macroporos e são caracterizadas por um primeiro segmento de curva, côncava ao eixo x, representando a formação de uma monocamada adsorvida à superfície, seguida por um segundo segmento, convexo ao eixo x, a qual representa a formação de múltiplas camadas adsorvidas sobre a superfície (JANNOT, 2008).

Os agregados reciclados obtiveram uma maior adsorção na faixa da formação de múltiplas camadas, principalmente a fração 0,6 e 1,2 mm. Nas três frações dos agregados estudados, a maior parte da água é adsorvida em umidades relativas superiores a 47 %, indicando que os grãos possuem um volume maior de poros entre micro e mesoporos.



Com os dados gerados no ensaio de isotermas de adsorção, também foi possível calcular a área específica dos agregados e a porosidade total, a qual inclui os poros abertos (conectados com a superfície) e os poros fechados (Tabela 16). Verificou-se que quanto menor o tamanho das partículas, maior é a porosidade total e a área específica. A área específica e a porosidade total das frações do agregado reciclado são superiores ao agregado leve, devido à presença de maior quantidade de microporos na superfície dos grãos do agregado reciclado, estando de acordo com as curvas de adsorção, uma vez que os grãos do agregado reciclado obtiveram uma maior adsorção que os grãos do agregado leve.

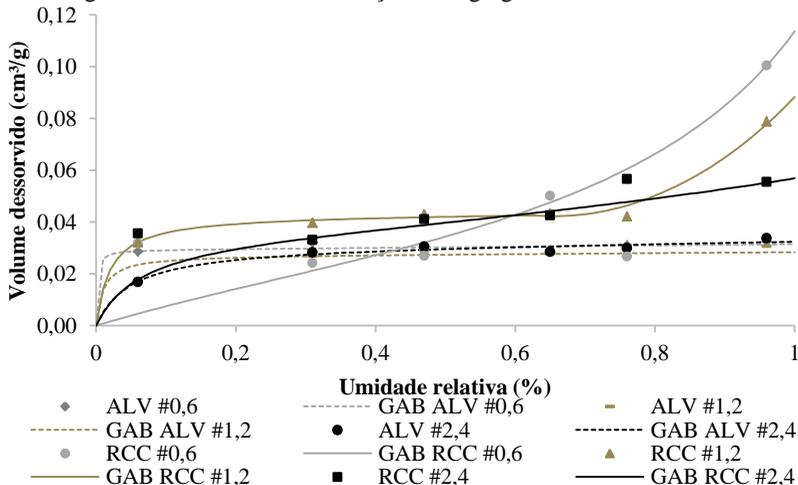
Tabela 16: Porosidade e área específica das frações dos agregados.

	Frações	Porosidade aberta (%)	Área específica (m ² /g)
RCC	2,4 mm	8,58	30
	1,2 mm	9,80	44
	0,6 mm	12,22	64
ALV	2,4 mm	2,41	28
	1,2 mm	2,68	41
	0,6 mm	3,51	44

Na Figura 13 têm-se as isotermas de dessorção dos agregados. O agregado leve liberou praticamente toda a água do seu interior em altas umidades relativas (96 %), sendo este o comportamento desejável para agregados leves eficientes de acordo com Henkensiefken (2008), Castro *et al.* (2011) e Ghourchian *et al.* (2013). Bem como, essa liberação de

água em altas umidades relativas implica que os agregados leves apresentam poros superiores a 100 nm (HENKENSIEFKEN, 2008).

Figura 13: Isotermas de dessorção dos agregados reciclados e leves.



O agregado reciclado em altas umidades relativas (96 %) liberou em torno de 50, 60 e 70 % da água interna, respectivamente para as frações 2,4 mm, 1,2 mm e 0,6 mm e, ao reduzir a umidade relativa, continuaram liberando a água do seu interior. Assim, essa água pode ser liberada para auxiliar na melhora da hidratação em idades tardias.

5.1.4 Lixiviação NBR 10005

Analisando a Tabela 17, foi verificado que após o ensaio de lixiviação os valores de pH e condutividade elétrica dos agregados foram semelhantes para as amostras. O valor do pH foi inferior a 7, ou seja, ácido, sendo que a solução de extração já apresentava pH ácido de 2,9 para o agregado reciclado e pH de 4,9 para o agregado leve. Por outro lado, o resultado de condutividade elétrica da curva de agregado reciclado foi inferior ao encontrado na curva do agregado leve. Isso ocorreu porque essa maior concentração de íons no líquido lixiviado ocasionou uma interação forte entre os íons de carga oposta, reduzindo a mobilidade dos íons, e conseqüentemente a sua condutividade.

Tabela 17: Análise química do líquido lixiviado das curvas dos agregados.

Elementos	ALV	RCC
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)
Ca	176,36	1858,14
Ti	63,68	52,29
Cr	54,00	< L.D.
Fe	53,65	49,51
Cu	36,38	40,28
Pb	34,45	31,47
Zn	22,66	16,46
Ni	18,01	11,01
Sr	6,75	11,23
pH	6,77	6,70
Condutividade	4062 $\mu\text{S}/\text{cm}$	3960 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Nota: ALV = agregado leve; RCC = agregado reciclado; L.D. = limite de detecção do equipamento.

Em relação à análise química dos agregados, percebeu-se que o elemento majoritário foi o cálcio, para os dois agregados analisados. Entretanto, para o agregado reciclado o valor é muito superior, uma vez que tem a presença da pasta de cimento, na qual há portlandita (responsável pela solubilidade do cálcio). Quanto aos outros elementos estudados, verificou-se praticamente os mesmos valores, sendo ligeiramente superior para o agregado leve, com exceção do cobre e do estrôncio. De todos os elementos químicos analisados, apenas o cromo na curva do agregado reciclado não apresentou liberação superior à norma NBR 10004 (2004).

5.1.5 Solubilização

Na Tabela 18 têm-se a análise química, o pH e a condutividade do agregado reciclado e leve obtido por meio do ensaio de solubilização. Observa-se que o agregado reciclado apresentou valores superiores de pH e condutividade elétrica, comparando-o com o agregado leve. O valor de condutividade elétrica dos agregados está coerente com a concentração de íons na solução, pois o valor encontrado foi superior para o agregado reciclado e este apresenta uma maior concentração dos elementos, sendo que a condutividade é uma aproximação do grau de concentração dos íons do sólido dissolvido em solução aquosa.

Tabela 18: Concentração dos elementos solubilizados nas curvas granulométricas do agregado leve e do agregado reciclado.

Elementos	ALV	RCC
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)
Ca	Não detectado	169,98
Ti	62,16	56,56
Fe	38,58	39,16
Cu	36,21	30,68
Pb	37,11	32,82
Zn	18,56	24,30
Cr	18,19	24,02
Ni	10,08	10,93
Sr	6,84	10,12
pH	7,11	9,41
Condutividade	1691 μ S/ cm	3287 μ S/ cm

Nota: RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve.

Em relação à concentração dos elementos solubilizados, verificou-se que a liberação foi semelhante para os dois agregados estudados, sendo ligeiramente superior para o agregado reciclado, com exceção para titânio, cobre e chumbo. No agregado reciclado, houve a presença de cálcio devido ao produto de hidratação do cimento (hidróxido de cálcio), e no agregado leve a concentração de cálcio foi inferior ao limite de detecção do equipamento. Para todos os elementos solubilizados, as concentrações foram superiores aos limites estipulados na NBR 10004 (2004).

Comparando-se os resultados do pH e condutividade elétrica do ensaio de lixiviação com o ensaio de solubilização (Tabela 17 e Tabela 18), nota-se que o pH do agregado leve e do reciclado do ensaio de solubilização foi superior, uma vez que no ensaio de solubilização o líquido lixiviante foi água destilada e deionizada com pH na faixa de 7. Já, os resultados de condutividade elétrica no ensaio de solubilização reduziram os valores de condutividade da curva do agregado leve e do agregado reciclado. Isto ocorreu, pois como a solução de extração do ensaio baseado na NBR 10005 é ácida, auxiliou para uma maior liberação dos elementos químicos presente nas amostras, aumentando assim a quantidade de íons no líquido lixiviado analisado.

5.1.6 Absorção granular por imersão

Os resultados de absorção por imersão das frações e da curva granulométrica do agregado reciclado e do agregado leve são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Absorção de água por imersão dos grãos.

Material Frações/ Curva	RCC		ALV	
	24 horas	48 horas	24 horas	48 horas
2,4 mm	9,2 %	9,8 %	34,0 %	34,7 %
1,2 mm	13,7 %	15,6 %	34,9 %	36,3 %
0,6 mm	18,3 %	22,6 %	34,9 %	38,8 %
D/d= 2,4/ 0,6 mm	12,6 %	13,4 %	27,5 %	30,4 %

Nota: RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve.

A absorção por imersão do agregado reciclado foi influenciada pela sua dimensão, uma vez que conforme reduziu-se a fração granulométrica, aumentou-se o consumo de água, devido a maior área superficial. Entretanto, em relação ao agregado leve, as três frações apresentaram praticamente o mesmo potencial de absorção, variando apenas na curva granulométrica.

A diferença de absorção dos agregados reciclado em relação aos agregados leve variou da ordem de 48 a 73 % nas primeiras 24 horas. Já em 48 horas de imersão, houve variação da ordem de 42 a 72 %, sendo a maior diferença encontrada na fração granulométrica 2,4 mm.

A absorção da curva granulométrica do agregado reciclado (12,6 %) está, praticamente, dentro do limite estipulado pela norma NBR 15116 de 2004, uma vez que a norma prevê absorção inferior ou igual a 12 % para agregados miúdos (< 4,8 mm) oriundos de concreto destinado ao preparo de concreto sem função estrutural.

5.1.7 Absorção granular por capilaridade

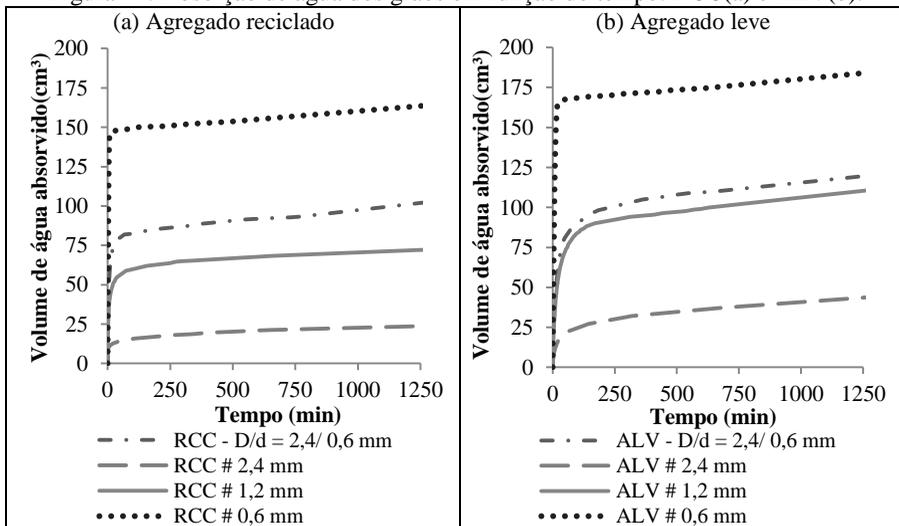
Na Figura 14 são apresentados os gráficos do volume absorvido pelo agregado em função do tempo para o agregado reciclado (a) e para o agregado leve (b).

Os dois agregados estudados apresentaram o mesmo comportamento, sendo que a amostra que mais absorveu foi à fração 0,6 mm, seguida pela curva granulométrica, a fração 1,2 mm e por fim a fração 2,4 mm. A velocidade de absorção dos agregados reciclados foi superior aos agregados leves, ou seja, a absorção foi mais rápida nos primeiros minutos. Entretanto, com o passar do tempo, o agregado leve absorveu

um volume maior de água, devido ao tamanho dos poros dos grãos do agregado leve serem superiores, e os grãos do agregado reciclado apresentaram uma maior conectividade dos poros.

Na absorção capilar, o agregado reciclado apresentou um potencial de absorção de 53 a 85 % inferior ao agregado leve, sendo a fração com maior diferença a 2,4 mm e com menor a fração 0,6 mm.

Figura 14: Absorção de água dos grãos em função do tempo: RCC(a) e ALV(b).



Na Figura 15, são apresentados os gráficos referentes ao estoque de água infiltrado nos grãos em função da raiz do tempo, com o auxílio dos gráficos foram determinadas as equações da reta e a sorptividade dos agregados, conforme descrito na Tabela 20.

Figura 15: Estoque de água infiltrada nos grãos pela raiz do tempo.

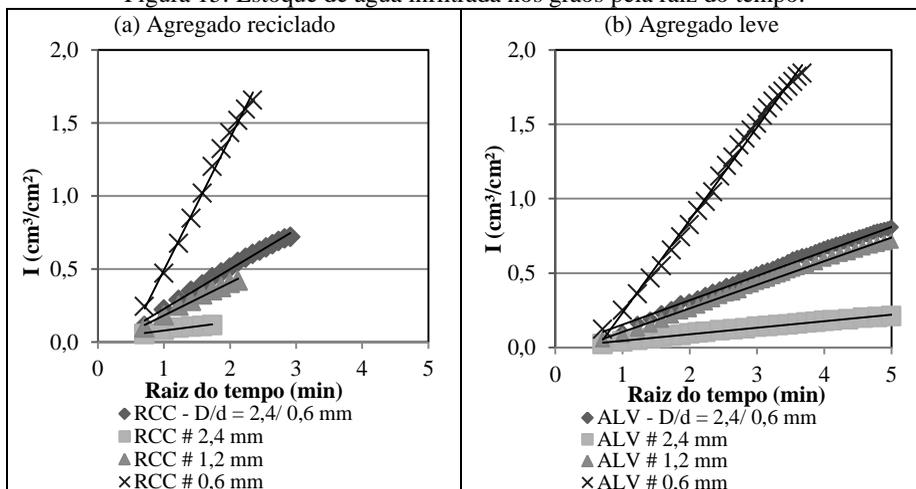


Tabela 20: Equações das retas para obtenção da sorptividade a água das frações dos agregados e das curvas.

	Frações/ Curvas	Equação da reta	R ²	Sorptividade (cm x min ^{1/2}) x 10 ⁻²
RCC	2,4 mm	0,0574x + 0,408	0,9393	5,74
	1,2 mm	0,2249x + 0,0416	0,9888	22,49
	0,6 mm	0,9033x + 0,408	0,9955	90,33
	D/d= 2,4/ 0,6 mm	0,2721x + 0,0452	0,9929	27,21
ALV	2,4 mm	0,0438x + 0,0014	0,9919	4,38
	1,2 mm	0,1585x - 0,0536	0,9941	15,85
	0,6 mm	0,6229x - 0,3891	0,9962	62,29
	D/d= 2,4/ 0,6 mm	0,164x - 0,0116	0,9915	16,40

Nota: RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve.

A sorptividade aumentou conforme reduziu-se a fração granulométrica. Os valores de sorptividade do agregado leve foram inferiores em todos os casos, quando comparados cada fração em particular com o agregado reciclado, estando de acordo com a curva de absorção capilar (Figura 14), uma vez que a sorptividade é referente à velocidade de absorção do material.

5.1.8 Caracterização micro estrutural

Os agregados reciclados apresentaram uma superfície densa com poucos poros, com diâmetros entre 5 e 100 μm (valores determinado de

acordo com o tratamento, que de acordo com Pedro, Brito e Evangelista (2014), o agregado reciclado tem o melhor desempenho quando apresenta poros muito pequenos (inferior a $100\ \mu\text{m}$). O agregado reciclado apresentou uma superfície rugosa e o seu principal constituinte é a pasta de cimento (Figura 16). Na fração 1,2 mm e 0,6 mm do agregado reciclado, verificou-se a presença de etringita (em forma de agulhas) e em todas as frações houve, também, a presença de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) devido à pasta de cimento presente em torno dos grãos, sendo comprovado pelo difratograma da curva do agregado reciclado (2,4 a 0,6 mm), o qual evidenciado a presença de etringita, quartzo e C-S-H (Figura 17).

Figura 16: Imagens dos grãos do agregado reciclado.

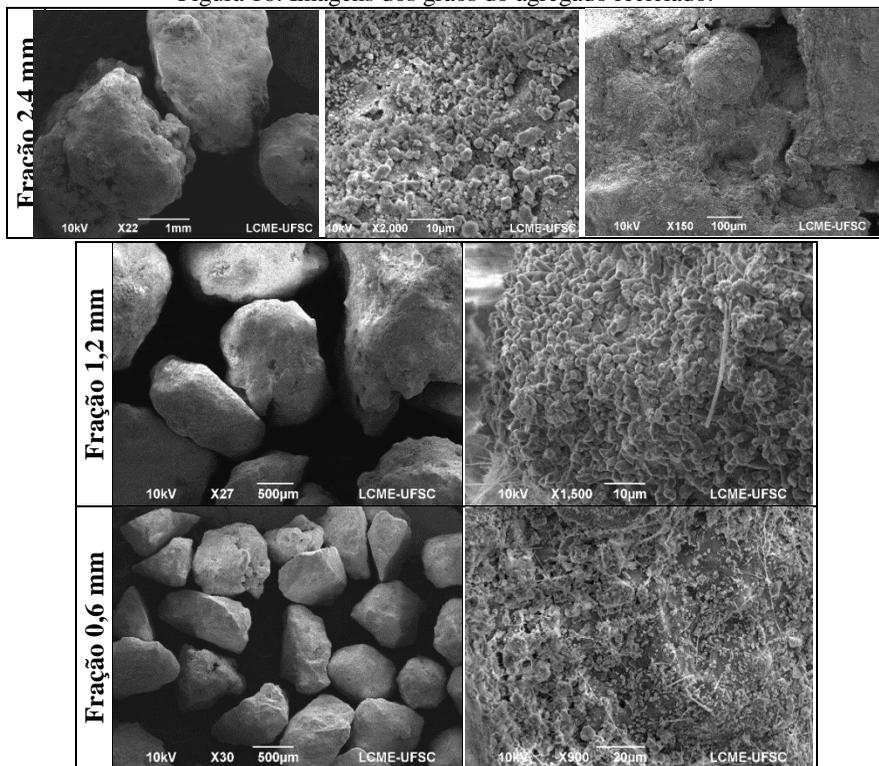
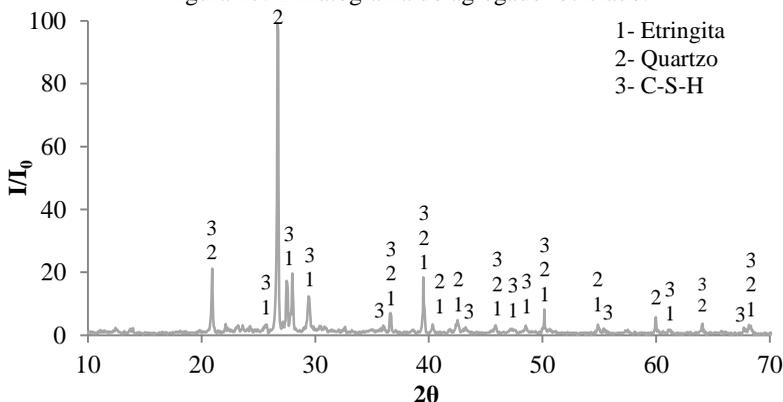


Figura 17: Difractograma do agregado reciclado.



Na Figura 18 são apresentadas as micrografias das frações do agregado leve. Nota-se que o agregado apresenta superfície porosa, com tamanho de poros entre 5 e 500 μm , o que auxilia para a alta absorção de água e posterior liberação de água do interior do agregado para a hidratação da pasta de cimento. A estrutura interna dos agregados leves apresentou uma proporção elevada de poros interligados e a maioria dos poros maiores são perfurados nas laterais por poros menores. O desempenho dos agregados porosos na cura interna está estritamente relacionado com a sua microestrutura e o agregado leve apresenta características adequadas para utilização como agente de cura interna devido à dimensão dos seus poros estarem no range de algumas dezenas de micrômetros (GHOURECHIAN *et al.*, 2013).

Na Figura 19 é apresentado o difratograma da curva do agregado leve (2,4 a 0,6 mm). Nota-se a presença majoritária de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e hematita (Fe_2O_3), sendo coerente com a análise química realizada no agregado, a qual foi citada anteriormente (Tabela 8).

Os grãos dos agregados reciclados e leves apresentaram formato irregular e arredondado. O agregado reciclado apresentou maior área específica, devido aos produtos hidratados da pasta aderida, a qual auxilia para o agregado apresentar uma maior adsorção que o agregado leve, bem como tem relação direta com a porosidade total do agregado (verificado no item 5.1.2). Porém, pelas imagens de MEV, verificou-se que os grãos do agregado leve apresentam maior porosidade aberta com presença de microporos no interior dos poros maiores.

Figura 18: Imagens dos grãos do agregado leve.

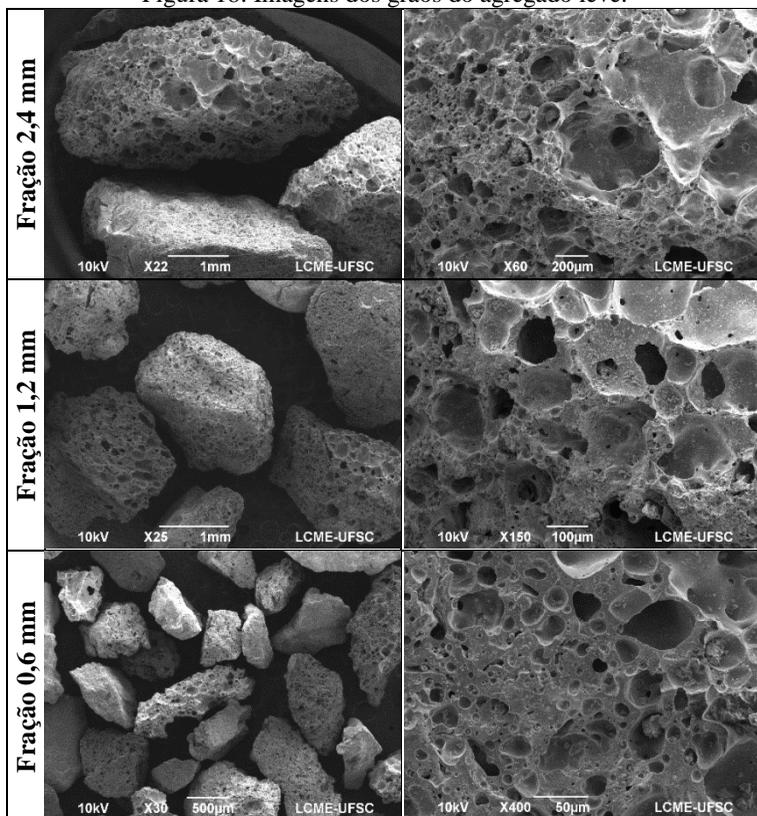
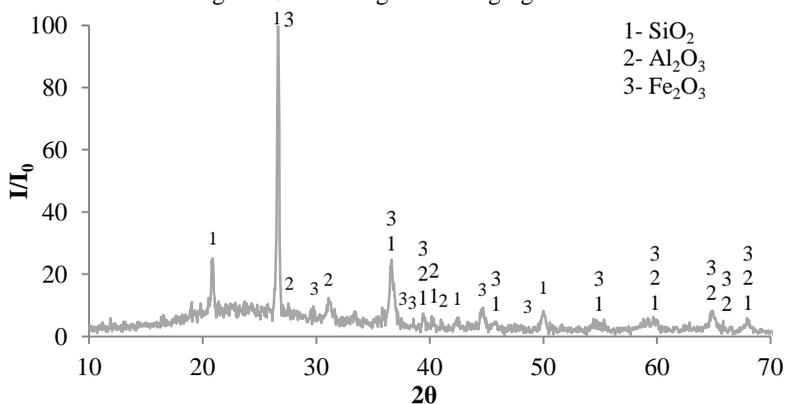


Figura 19: Difratoograma do agregado leve.



5.1.9 Sorção dos grãos

Realizou-se o ensaio de sorção dos grãos na curva granulométrica em duas etapas, conforme descrito no item 4.2.2.6. Os resultados da primeira etapa, a qual foi realizada a imersão dos agregados na solução com chumbo, cromo e zinco (cada metal separadamente), são apresentados na Tabela 21. Com os resultados da primeira etapa, que está dividido por solução de metal, têm-se o teor de metal que lixiviou. Por exemplo: o agregado leve na solução com 300 ppm de chumbo, lixiviou 115 ppm, isto é, ficou retido no agregado 185 ppm. Após essa primeira análise química, realizou-se o ensaio de conformidade (lixiviação) no agregado, e o resultado é apresentado na Tabela 22, aonde verificou-se que foi lixiviado apenas 0,01 ppm de chumbo do agregado leve, isto é, ficou retido no agregado leve, praticamente 62 % do chumbo. Realizou-se essa mesma análise para o agregado reciclado e para os demais metais de interesse.

O agregado reciclado, em todos os casos, apresentou maior potencial de retenção, em comparação com o agregado leve, devido ao pH básico da solução quando presente o agregado reciclado. O agregado reciclado auxiliou para o aumento do pH da solução pela presença da pasta de cimento ao redor do grão. Enquanto que, nas amostras com agregado leve, o pH foi ácido para a solução com chumbo e zinco e na solução com cromo, mesmo básica, ainda foi inferior ao pH da solução com agregado reciclado (Tabela 21).

Tabela 21: Análise química da solução.

SOLUÇÃO COM 300 PPM DE CHUMBO		
Elementos	ALV	RCC
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)
Ca	0,01	41,45
Cr	0,01	0,01
Pb	114,95	0,15
Zn	5,25	2,25
pH	6,201	9,666
Condutividade	255,90 $\mu\text{S}/\text{cm}$	337,60 $\mu\text{S}/\text{cm}$
SOLUÇÃO COM 300 PPM DE CROMO		
Elementos	ALV	RCC
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)
Ca	0,01	375,95
Cr	272,05	256,65
Pb	0,01	0,01
Zn	1,45	1,55
pH	8,806	10,577
Condutividade	925,20 $\mu\text{S}/\text{cm}$	55,65 $\mu\text{S}/\text{cm}$
SOLUÇÃO COM 300 PPM DE ZINCO		
Elementos	ALV	RCC
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)
Ca	0,01	156,85
Cr	1,95	0,01
Pb	0,01	0,01
Zn	248,65	12,75
pH	6,616	7,513
Condutividade	639,70 $\mu\text{S}/\text{cm}$	778,80 $\mu\text{S}/\text{cm}$

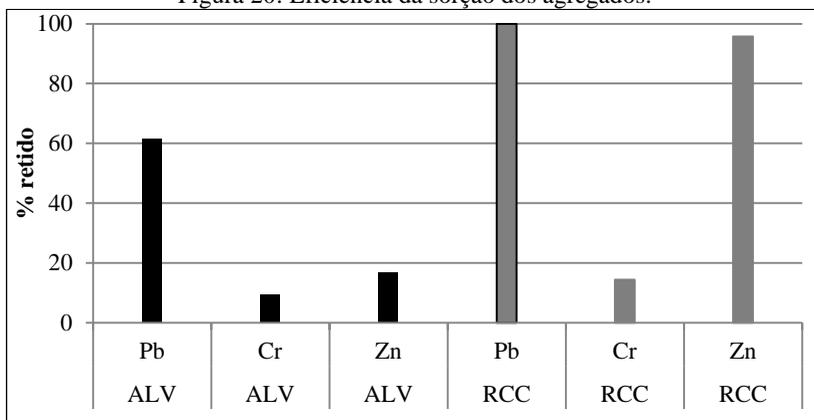
Na Tabela 22 estão os resultados das análises químicas após o ensaio de lixiviação no agregado (segunda etapa do ensaio). A partir dos resultados de lixiviação percebeu-se que os metais foram, em grande parte, ligados ao agregado e uma parte precipitada. Pois, praticamente, não houve lixiviação dos metais analisados, uma vez que, o máximo que lixiviou foi 0,85 ppm para o agregado leve, quando saturado com zinco. Nas demais amostras lixiviou 0,01 ppm. O pH do líquido lixiviante após o ensaio de conformidade aumentou, quando comparado com os resultados da Tabela 21, porém, o pH das amostras com agregado reciclado permaneceram superiores às amostras com agregado leve, as quais após o ensaio de conformidade apresentam pH básico, em todos os casos.

Tabela 22: Análise química após o ensaio de conformidade.

CHUMBO		
Elementos	ALV	RCC
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)
Ca	0,01	0,01
Cr	6,45	5,75
Pb	0,01	0,01
Zn	0,01	0,01
pH	9,228	10,079
Condutividade	24,20 $\mu\text{S}/\text{cm}$	81,24 $\mu\text{S}/\text{cm}$
CROMO		
Elementos	ALV	RCC
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)
Ca	0,01	0,01
Cr	0,01	0,01
Pb	0,15	0,01
Zn	8,15	0,55
pH	8,789	10,254
Condutividade	31,70 $\mu\text{S}/\text{cm}$	89,52 $\mu\text{S}/\text{cm}$
ZINCO		
Elementos	ALV	RCC
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)
Ca	0,01	0,01
Cr	0,75	0,01
Pb	0,01	0,01
Zn	0,85	0,01
pH	7,480	9,518
Condutividade	41,67 $\mu\text{S}/\text{cm}$	54,54 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Com base nos resultados da Tabela 21 e da Tabela 22 calculou-se a eficiência do agregado poroso como sorvente químico. Na Figura 20 têm-se o agregado poroso com o metal em função da porcentagem retida nos grãos da curva granulométrica. Pode-se afirmar que o agregado reciclado foi mais eficiente que o agregado leve, uma vez que absorveu/ adsorveu acima de 96 % do chumbo e do zinco e 15 % do cromo. Enquanto que o agregado leve absorveu/ adsorveu 62 % do chumbo e menos de 20 % do zinco e do cromo.

Figura 20: Eficiência da sorção dos agregados.



Conforme verificado nos resultados do pH, verificou-se que essa maior eficiência do agregado reciclado foi devido ao pH elevado e de suas fases de íons trocáveis. O mecanismo de absorção/ adsorção do metal pelo agregado reciclado pode ser caracterizado através de três fases: a deposição inicial de um precipitado rico em zinco ou cromo sobre a superfície do agregado reciclado a alguns micrometros de profundidade, a formação de um segundo depósito de cerca de 10 μm e um precipitado superficial final. Enquanto que, o mecanismo de interação do chumbo com o agregado reciclado ocorre via difusão na matriz de cimento (COLEMAN, LEE e SLIPPER, 2005).

5.1.10 Conclusões parciais

O agregado reciclado apresentou uma maior quantidade de micro poros na sua superfície e com isso teve uma maior área superficial que auxiliou na maior adsorção dos agregados. Já, os agregados leves, são mais porosos com uma maior quantidade de macro poros na superfície e possuem uma maior capacidade de absorção e desorção. Entretanto, para fim de cura interna, o mais importante são as propriedades de desorção, no qual ficou claro que os dois agregados conseguem liberar a água do seu interior em altas umidades relativas (96 %), com o agregado leve conseguindo liberar praticamente 100 % da água. Enquanto que, o agregado reciclado, libera na faixa de 50 a 70 %. Consequentemente, a água dos agregados porosos estará disponível para a hidratação da pasta de cimento nas primeiras idades.

Sobre o ensaio de sorção do agregado, concluiu-se que os dois agregados podem ser utilizados como sorvente químico. Entretanto, o agregado reciclado foi mais eficiente absorvendo/ adsorvente praticamente 100 % do chumbo e do zinco devido ao seu pH elevado. O cromo foi o metal com menor teor de sorção do agregado, porém, o agregado reciclado foi, em torno, de 6 % mais eficiente que o agregado leve.

Com base nos resultados dos ensaios realizados nos agregados, pode-se concluir que os dois agregados (reciclado e leve) são aptos a serem considerados agentes de cura interna, uma vez que apresentam poros superiores a 100 nm (0,1 μ m), sendo esse o limite inferior para uma adequada liberação da água do interior do grão. Além disso, os agregados apresentam adequada absorção de água, que também é um pré-requisito para um agente de cura interna.

Assim, a partir destes resultados satisfatórios para os agregados (leves e reciclados) como agentes de cura e sorvente químico, seguiu-se para a etapa 02 da pesquisa, na qual, será analisada a eficiência dos agregados na matriz cimentícia.

5.2 CONSUMO DE AGREGADO COMO AGENTE DE CURA INTERNA

A quantidade de agregado (utilizado como reservatório de água), necessária para fornecer o teor de água para a realização da cura interna nas argamassas, foi calculado com a Equação 12, citada anteriormente. Para efeito de cálculo, considerou-se a retração química do cimento 0,07 g água/ g cimento (de acordo com Bentz, Lura e Roberts (2005) esse é o valor típico para a retração do cimento Portland para relações a/c acima de 0,36) e o máximo esperado do grau de hidratação do cimento foi 1,0.

A saturação dos agregados foi calculada com base nos resultados do ensaio de absorção 24 e 48 horas, assim foi considerado o grau de saturação dos agregados 0,9. Para o consumo de cimento, como não ocorreu variação significativa entre as argamassas com agregado reciclado e entre as argamassas com agregado leve, considerou-se a média do consumo. A massa necessária de agregado leve ou reciclado está apresentada na Tabela 23, junto com os dados utilizados no cálculo.

O valor encontrado foi inferior ao utilizado no trabalho, pois conforme relatado anteriormente, o cálculo considera que toda a água no interior dos agregados estará prontamente disponível para ser liberado para a pasta, o que não ocorre, pois o poro pode ser muito pequeno para liberar a água ou um grão de cimento pode entrar no poro e impedir a liberação, muitos são os fatores que devem ser considerados. Devido a

isso, utilizou-se uma quantidade maior de agregado para fornecer a quantidade de água necessária para a hidratação do cimento.

Tabela 23: Dados utilizados no cálculo e a quantidade necessária de agregado reciclado ou agregado leve.

	RCC	ALV
Consumo de cimento	448,4 kg/m ³	431,1 kg/m ³
Grau de saturação do agregado	0,9	0,9
Absorção do agregado	12,6 %	27,5 %
Massa de agregado necessário	276,8 kg/m³	121,9 kg/m³

Nota: RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve.

Assim, definiu-se a utilização de 25 %, considerado como teor ideal de agregado poroso (agente de cura interna) para fornecer a umidade necessária à realização da cura interna (HOFF, 2002; HENKEN-SIEFKEN *et al.*, 2009; VEGAS *et al.*, 2009; MEDINA, FRÍAS e ROJAS, 2014). Em relação ao valor calculado, houve um aumento de 4 % para o agregado reciclado e 3 % para o agregado leve.

Para manter a saturação da pasta de cimento e completar a hidratação, foi necessário 31,4 kg/m³ de água quando utilizado o agregado reciclado e 30,2 kg/m³ quando utilizado o agregado leve. Essa diferença na quantidade de água necessária foi devido ao consumo de cimento do material.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

5.3.1 Estado fresco

5.3.1.1 Propriedades físicas

As características físicas das argamassas são apresentadas na Tabela 24. A substituição parcial do agregado natural por agregado reciclado reduziu a massa específica das argamassas no estado fresco na faixa de 1,4 a 14,0 % e para as argamassas com agregado leve de 6,1 a 19,2 % em relação à argamassa fabricada com apenas agregado natural. Devido à menor massa específica dos agregados reciclado e leve em relação ao agregado natural (verificado no item 5.1.1), corroborando com Jiménez *et al.* (2013), Ledesma *et al.* (2014) e Neno, Brito e Veiga (2014) que também observaram redução da massa específica de argamassas com agregado reciclado. Em relação à saturação prévia, as argamassas apresentaram uma tendência de quando utilizado o agregado

leve reduzir a massa específica e com agregado reciclado o oposto foi verificado.

Tabela 24: Características físicas das argamassas.

	Material/ Argamassas	γ (g/cm ³)	Teor de ar in- corporado (%)	Flow (mm)	Consumo de cimento (kg/m ³)
	REF-AN	2,14	7,3	290,0	475,5
	REF	2,07	9,8	197,5	460,2
RCC + AN	Pb 100 ppm	1,84	19,9	235,0	408,8
	Cr 100 ppm	2,09	9,1	204,5	464,0
	Zn 100 ppm	1,91	16,7	177,5	425,0
	Pb 300 ppm	1,95	15,2	199,0	432,8
	Cr 300 ppm	2,02	12,0	219,0	449,1
	Zn 300 ppm	2,09	9,0	209,5	464,6
	REF + SAT	1,92	16,2	181,0	427,7
	Pb 100 ppm + SAT	1,99	13,4	211,0	442,0
	Cr 100 ppm + SAT	2,08	9,4	187,5	462,6
	Zn 100 ppm + SAT	2,08	9,4	177,0	462,5
	Pb 300 ppm + SAT	1,98	13,8	203,5	440,2
	Cr 300 ppm + SAT	2,11	8,1	197,0	469,1
	Zn 300 ppm + SAT	2,11	8,3	216,0	468,3
	ALV + AN	REF	1,73	25,2	178,5
Pb 100 ppm		1,98	14,0	178,0	439,8
Cr 100 ppm		1,99	13,5	168,0	442,7
Zn 100 ppm		2,01	12,5	175,5	447,5
Pb 300 ppm		1,98	14,0	180,0	440,3
Cr 300 ppm		2,00	13,2	175,5	444,2
Zn 300 ppm		1,98	14,0	172,5	440,1
REF + SAT		1,79	22,3	177,5	392,3
Pb 100 ppm + SAT		1,99	13,6	162,5	442,0
Cr 100 ppm + SAT		1,95	15,5	155,5	432,6
Zn 100 ppm + SAT		1,96	14,8	160,0	435,9
Pb 300 ppm + SAT		1,94	15,7	161,5	431,5
Cr 300 ppm + SAT		1,99	13,5	143,0	442,5
Zn 300 ppm + SAT		1,92	16,6	164,0	426,8

Nota: γ = Massa específica; Flow = índice de consistência; REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb= chumbo tetravalente; Cr=cromo hexavalente; Zn=zinco bivalente.

As argamassas reduziram o teor de ar incorporado das amostras quando adicionado os metais pesados nos dois teores (100 e 300 ppm) em relação às suas respectivas referências, exceto no caso das argamassas com agregado reciclado (Pb 100 e 300 ppm, Zn 100 ppm e Cr 300 ppm) sem molhagem prévia, na qual as amostras apresentaram aumento da porosidade em relação à referência (Tabela 24).

A incorporação de 25 % de agregado reciclado nas argamassas aumentou o teor de ar incorporado em relação à argamassa com agregado natural, estando em desacordo com Vegas *et al.* (2009), Jiménez *et al.* (2013) e Ledesma *et al.* (2014) que não encontraram diferenças significativas nos valores de ar incorporado das argamassas. Essa diferença é atribuída a menor absorção de água do agregado reciclado, que nos três estudos citados foi inferior a 9 %.

O teor de ar incorporado corresponde aos vazios formados pela entrada de ar no interior da argamassa, estando diretamente relacionado com o índice de consistência. Ou seja, quanto maior o teor de ar incorporado, mais leve será a argamassa e conseqüentemente mais trabalhável. Entretanto, nesse estudo, isso não foi verificado, uma vez que a argamassa AN, entre todas as argamassas, apresentou o menor teor de ar incorporado e a maior trabalhabilidade. Isso ocorreu pela maior absorção de água dos agregados porosos (reciclado e leve), que absorveu parte da água disponível para o amassamento das argamassas, bem como quando realizado a saturação prévia do agregado a relação água/ cimento efetiva (teor de água de amassamento adicionado à argamassa) ficou em torno de 0,38.

A redução da trabalhabilidade das argamassas com substituição parcial do agregado natural por agregado reciclado ou agregado leve em relação à argamassa AN foi devido à maior absorção de água desses agregados e pela textura superficial, que conforme observado nas imagens de MEV (item 5.1.8), esses agregados, apresentaram uma superfície rugosa.

A trabalhabilidade das argamassas com agregado leve apresentou uma leve redução, quando comparada às argamassas com agregado reciclado, devido a maior porosidade e absorção de água do agregado leve. Em relação à referência (RCC), as argamassas com agregado reciclado apresentaram maior trabalhabilidade quando incorporado os metais pesados (exceto para as argamassas RCC+ Zn 100 ppm e RCC+ Zn 100 ppm + SAT). Já nas argamassas com agregado leve ocorreu o oposto, as argamassas com incorporação de metal reduziram a trabalhabilidade em relação à referência ALV (Tabela 24). Com relação à saturação prévia, observou-se que a incorporação dos metais pesados reduziu a trabalhabilidade das argamassas, com exceção para as argamassas RCC+ Pb 300 ppm+ SAT e RCC+ Zn 300 ppm+ SAT.

Ainda na Tabela 24, nota-se que o consumo de cimento das argamassas com agregado leve e incorporação de metal (chumbo, cromo ou zinco) apresentaram um consumo praticamente constante, com aumento brusco em comparação com suas argamassas de referências. Já,

nas argamassas com agregado reciclado, quando realizado a saturação prévia das argamassas, a incorporação de qualquer teor de metal pesado aumentou o consumo de cimento em relação à referência (RCC+SAT). Nas argamassas de referências, verificou-se uma redução do consumo de cimento quando realizado a molhagem prévia. Entretanto, esse fato não ocorreu nas argamassas com incorporação de metal, sendo que nessas argamassas a realização da molhagem prévia aumentou ou manteve igual o consumo de cimento. Em relação à argamassa produzida com 100 % agregado natural, houve diminuição do consumo de cimento as argamassas com agregado reciclado ou leve.

De modo geral, a maior influência nas propriedades das argamassas foi devido à substituição parcial do agregado natural por agregado leve, que por ser um material mais poroso e com menor massa específica que o agregado natural e o agregado reciclado, proporcionou uma redução da massa específica, do índice de consistência e do consumo de cimento das argamassas, e aumentou do teor de ar incorporado.

Já, entre os três metais pesados estudados, o chumbo tetravalente foi o que menos influenciou nas propriedades físicas das argamassas, não havendo distinção do teor de chumbo adicionado e da saturação prévia.

5.3.1.2 Calor de hidratação

A hidratação do cimento é um processo exotérmico e a observação da liberação de calor fornece informações importantes sobre a cinética de hidratação dos constituintes do cimento. Na Tabela 25 são apresentados os resultados de calor de hidratação para cada amostra estudada.

A substituição parcial do agregado natural por agregado reciclado retardou a hidratação das argamassas: REF-RCC, RCC+Pb100 ppm, RCC + Cr 100 ppm, RCC+Zn100ppm, RCC+Cr300 ppm, RCC+Pb300 ppm +SAT e RCC+Zn300 ppm +SAT, e nas demais amostras não foi verificado alteração do início de hidratação em relação à argamassa produzida com apenas agregado natural (AN). Logo, praticamente, todas as amostras fabricadas com substituição parcial do agregado natural por agregado leve obtiveram retardo da hidratação, com exceção da REF-ALV e ALV+Pb100 ppm + SAT.

Em 9 das 14 amostras com agregado leve, tiveram o período de indução prolongado, apresentando início da hidratação após 4 horas do contato do cimento com a água (aumentos de 21 a 129 minutos em rela-

ção à argamassa REF-AN), enquanto que nas amostras com agregado reciclado houve retardo de 21 a 53 minutos (Tabela 25).

Tabela 25: Resultados do ensaio de calor de hidratação.

Argamassa/ Composição	Início pega (h:min)	Fim pega (h:min)	Δt (h:min)	Max Qi (J/kg)	Q _{máx} (J/kg)	α (%)	
REF-AN	3:05	7:50	4:45	78,7	186,9	42,0	
RCC + AN	REF	3:42	8:22	4:40	70,7	185,6	41,7
	Pb 100 ppm	3:38	8:14	4:36	65,7	131,5	29,6
	Cr 100 ppm	3:48	8:58	5:10	110,0	290,8	65,4
	Zn 100 ppm	3:56	7:58	4:38	58,9	119,0	26,8
	Pb 300 ppm	3:14	7:26	4:12	61,2	158,8	35,7
	Cr 300 ppm	3:50	9:20	5:30	110,3	293,0	65,9
	Zn 300 ppm	3:14	8:36	4:40	109,0	264,5	59,5
	REF + SAT	3:00	7:36	3:36	92,0	191,4	43,0
	Pb 100 ppm+SAT	3:10	8:04	4:54	95,6	219,2	49,3
	Cr 100 ppm+SAT	3:02	7:46	4:44	84,7	179,6	40,4
	Zn 100 ppm+SAT	3:10	7:34	4:24	79,8	163,3	36,7
	Pb 300 ppm+SAT	3:26	7:54	4:28	91,3	204,9	46,1
	Cr 300 ppm+SAT	3:12	7:58	4:46	80,2	173,1	38,9
	Zn 300 ppm+SAT	3:58	8:46	4:48	83,9	174,6	39,3
ALV + AN	REF	3:12	7:52	4:40	59,7	152,8	34,4
	Pb 100 ppm	4:38	9:24	4:46	73,6	169,2	38,0
	Cr 100 ppm	4:36	9:26	4:50	69,1	146,9	33,0
	Zn 100 ppm	3:36	8:26	4:50	63,7	126,7	28,5
	Pb 300 ppm	4:32	9:04	4:32	66,7	138,8	31,2
	Cr 300 ppm	4:26	9:20	4:54	65,4	133,1	29,9
	Zn 300 ppm	3:26	8:26	5:00	76,1	147,6	33,2
	REF + SAT	3:46	9:38	5:52	86,6	188,1	42,3
	Pb 100 ppm+SAT	3:12	8:58	5:46	73,6	153,5	34,5
	Cr 100 ppm+SAT	4:12	9:26	5:14	66,9	142,4	32,0
	Zn 100 ppm+SAT	4:38	9:38	5:00	67,9	151,0	33,9
	Pb 300 ppm+SAT	4:36	9:16	4:40	81,8	197,0	44,3
	Cr 300 ppm+SAT	4:28	9:54	5:26	72,2	159,4	35,8
	Zn 300 ppm+SAT	5:14	9:40	4:26	72,2	150,9	33,9

Nota: Max Qi= Máximo calor gerado; Q_{máx}= Calor total gerado; α = grau de hidratação; REF= referência; AN= areia padrão; RCC= agregado reciclado; ALV= agregado leve; SAT= saturado previamente; Pb=chumbo; Cr=cromo; Zn=zinco.

A argamassa que teve o tempo de maior retardo na hidratação, foi a argamassas com agregado leve com incorporação de 300 ppm de zinco e realização da saturação prévia no qual, o tempo ficou em 5 horas e 14 minutos. Já, para as argamassas com agregado reciclado, o tempo máximo para início de pega foi de 3 horas e 58 minutos, também para a argamassa com 300 ppm de zinco, com realização da saturação prévia.

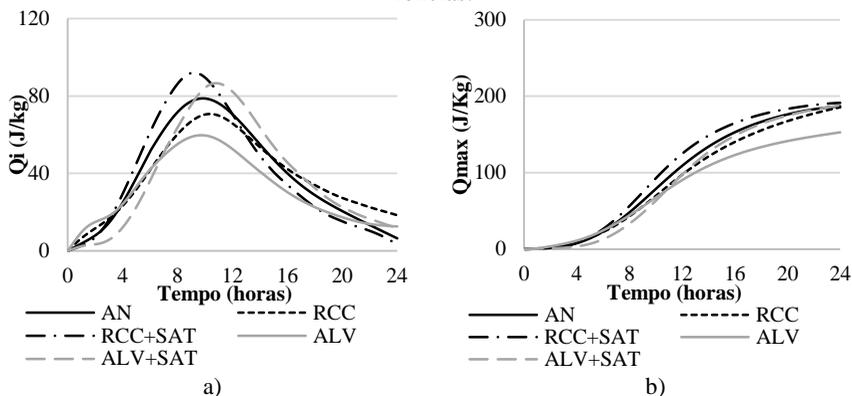
Esse atraso na hidratação das argamassas com 300 ppm de zinco ocorreu pela sorção do zinco no C-S-H e pela precipitação de uma nova fase, conforme o ensaio de difração de raios-X (apresentado no item 5.3.2.5.3). O zinco reagiu com o C_3S e com o C_3A , formando novos compostos, e conseqüentemente ocasionou o retardo da supersaturação de $Ca(OH)_2$ e a precipitação do C-S-H (Tabela 25). Corroborando com os resultados de Moulin *et al.* (2000) e Gineys, Aouad e Damidot (2010 e 2011), que verificaram que ocorreu um atraso na hidratação da pasta de cimento quando incorporado, chumbo ou zinco, devido a influência desses metais na hidratação do C_3S .

Já, em relação ao fim de pega, o mais tardio foi para a argamassa com agregado leve e incorporação de 300 ppm de cromo e com realização da saturação prévia (9 horas e 54 minutos) e, para o agregado reciclado foi à argamassa com 300 ppm de cromo (9 horas e 20 minutos). Enquanto os valores mais tardios de início e fim de pega foram para as argamassas com agregado leve. As argamassas com agregado reciclado foram as primeiras a iniciar e finalizar a pega: argamassa de referência realizada a saturação prévia (RCC + SAT, 3 horas) e argamassas com incorporação de 300 ppm de chumbo (RCC + Pb 300 ppm, 7 horas e 26 minutos), respectivamente (Tabela 25).

Ainda na Tabela 25, o maior calor de hidratação gerado pelas argamassas com agregado reciclado foi de 110,3 J/kg para a argamassa com incorporação de 300 ppm de cromo e o menor foi de 58,9 J/kg para a argamassa com incorporação de 100 ppm de zinco. Já, para as argamassas com agregado leve, o maior calor de hidratação foi gerado pela argamassa de referência ALV (90,3 J/kg) e o menor calor gerado foi para a argamassa com 100 ppm de zinco com saturação prévia (63,7 J/kg).

Da Figura 21 a Figura 27 são apresentadas as curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas, sendo: a) o calor gerado em função do tempo e, b) o acumulado do calor gerado em função do tempo. O primeiro pico de evolução de calor não foi observado em nenhuma amostra, pois ocorre dentro de poucos minutos e desde o preparo da amostra até a colocação no aparato do ensaio, demorou-se em torno de 10 minutos.

Figura 21: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de referências.



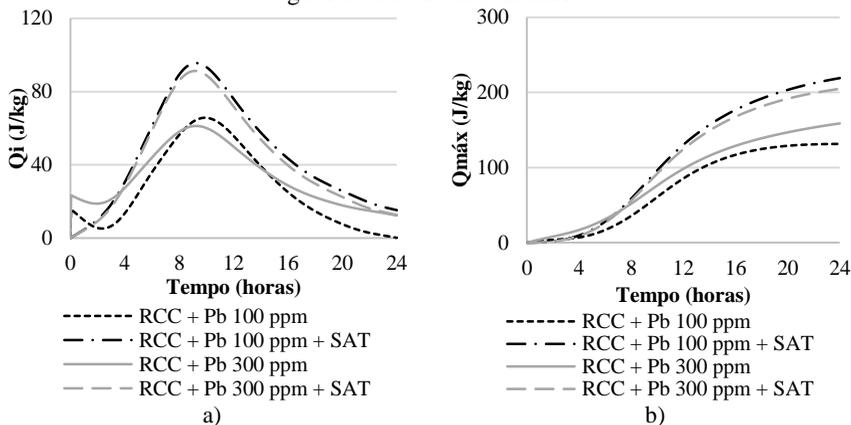
Percebe-se, na Figura 21, que a realização da saturação prévia aumentou o calor de hidratação das argamassas (RCC+SAT e ALV+SAT) em relação às suas referências (RCC e ALV). Além disso, essas argamassas obtiveram maior teor de calor gerado em relação à argamassa AN, devido à presença dos agregados porosos (agregado reciclado e leve) que auxiliaram para a melhor hidratação do cimento (formando produtos de hidratação adicionais) pela disponibilidade da água extra, promovida pela realização da cura interna. Os resultados obtidos aqui estão de acordo com os resultados de grau de hidratação e de resistência mecânica com 1 dia de hidratação dessas amostras, as quais apresentaram valores superiores à argamassa AN.

O menor grau de hidratação das amostras sem molhagem prévia pode ser explicado pela absorção de água na estrutura porosa de suas partículas. As partículas dos agregados porosos podem absorver certa quantidade de água livre nos seus poros durante a mistura. Por outro lado, isto leva a menos água disponível para que a hidratação do cimento e, assim, o grau de hidratação é menor na fase inicial. Entretanto, como os poros atuam como reservatório de água, com o progresso da hidratação do cimento, a umidade relativa na pasta de cimento reduz e a água que foi absorvida será liberada para promover a continua hidratação do cimento e o conseqüente aumento do grau de hidratação nas fases posteriores, estando de acordo com os resultados dos ensaios de resistência mecânica e de ressonância magnética nuclear. Além disso, a água absorvida pode aumentar a reação pozolânica do Ca(OH)_2 com os íons de SiO_2 presente no agregado leve, isso será melhor discutido no ensaio de ressonância magnética nuclear (item 5.3.2.5.2).

Na argamassa de referência com agregado leve, a realização da saturação prévia retardou o início da pega em 41 minutos e prolongou em 67 minutos a variação do tempo entre o início e o fim de pega, quando comparada com a argamassa com apenas agregado natural (AN). A argamassa sem molhagem prévia do agregado reciclado (RCC) obteve um atraso de 37 minutos no seu início de pega, enquanto que as argamassas ALV e RCC+SAT não obtiveram alteração no início da hidratação, em comparação com a REF-AN.

Na Figura 22 são apresentadas as curvas de calor de hidratação das argamassas com agregado reciclado e incorporação de chumbo. Percebe-se que, como nas referências, as argamassas com a realização da molhagem prévia do agregado apresentaram maior liberação de calor e, também, maior variação entre o início e fim de pega. Já, em relação às referências (RCC e RCC+SAT), fica claro que a argamassa com 300 ppm de chumbo (RCC+ Pb 300 ppm) acelerou o início de pega em 28 minutos, enquanto que as argamassas com 100 ppm de chumbo não apresentaram alteração no início da hidratação. Nas argamassas com a realização da molhagem prévia, percebeu-se que a argamassa com 100 ppm não alterou o início de pega, mas com 300 ppm houve o retardo em 26 minutos.

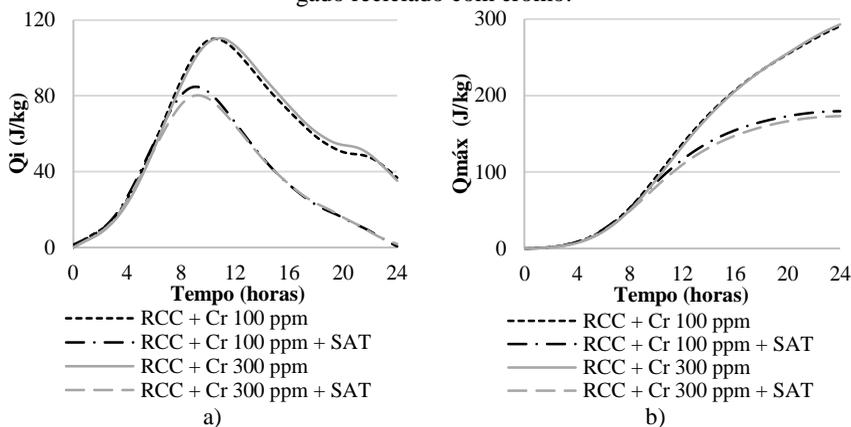
Figura 22: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de agregado reciclado com chumbo.



As curvas de calor de hidratação das argamassas com agregado reciclado e com cromo são apresentadas na Figura 23. Nas argamassas com incorporação de cromo ocorreu o oposto das argamassas de referência, uma vez que as argamassas com cromo e molhagem prévia apre-

sentaram o menor calor de hidratação, porém o calor gerado nas argamassas com molhagem prévia foi, praticamente, o mesmo da argamassa de referência com molhagem prévia. As argamassas com 100 e 300 ppm de cromo sem a realização da molhagem prévia apresentaram aumento em torno de 56 % do calor gerado. A incorporação de cromo hexavalente não afetou o início da hidratação das argamassas.

Figura 23: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de agregado reciclado com cromo.



Verifica-se na Figura 24 que, em relação à referência (RCC), a argamassa com agregado reciclado e incorporação de 100 ppm de zinco acelerou em 22 minutos o início de pega. Entretanto, as outras 3 argamassas apresentaram retardo do início de pega em 14, 10 e 58 minutos, para as argamassas RCC+ Zn 300 ppm, RCC+ Zn 100 ppm+ SAT e RCC+ Zn 300 ppm+ SAT, respectivamente. O que era o esperado, uma vez que, o zinco atua como retardador da hidratação, formando uma camada gelatinosa (de hidróxido de zinco) ao redor do grão de cimento dificultando a hidratação (CHEN *et al.*, 2009). Já, em relação ao calor gerado, as argamassas reduziram o calor gerado em relação à referência (RCC e RCC+SAT), exceto a argamassa RCC+ Zn 300 ppm, que aumentou o seu calor gerado. A mesma tendência do calor gerado foi observada em relação ao grau de hidratação, com a amostra com 300 ppm de zinco aumentando o grau de hidratação em 42 %, e as demais amostras reduzindo em 36, 15 e 9 %, respectivamente, para RCC+ Zn 100 ppm, RCC+ Zn 100 ppm+ SAT e RCC+ Zn 300 ppm+ SAT.

Figura 24: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de agregado reciclado com zinco.

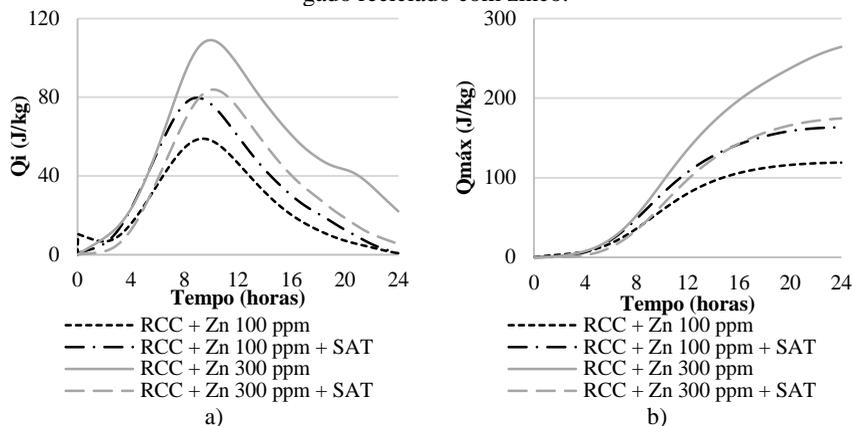
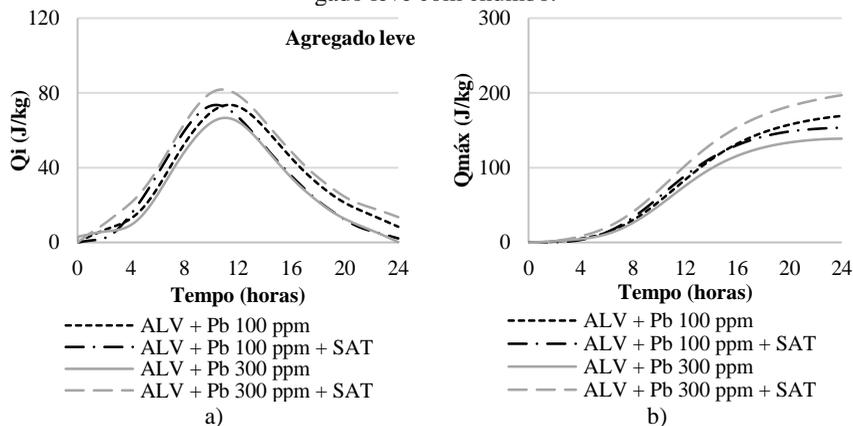


Figura 25: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de agregado leve com chumbo.

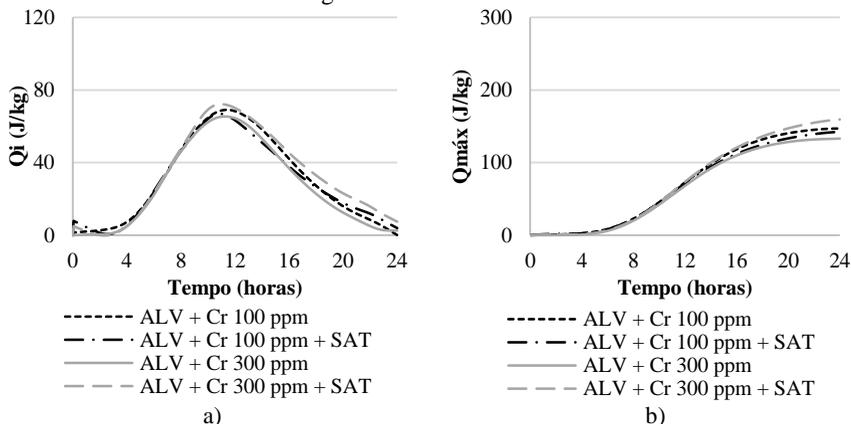


Na Figura 25 percebe-se que as argamassas com agregado leve e incorporação de chumbo e realização da molhagem prévia apresentaram maior calor de hidratação que as argamassas sem molhagem prévia. Observou-se o mesmo comportamento para as argamassas com agregado reciclado e incorporação de chumbo. Em comparação com a argamassa de referência (ALV e ALV+SAT), as argamassas ALV+ Pb 100 ppm, ALV+ Pb 300 ppm e ALV+ Pb 300 ppm+ SAT apresentaram um retardo no início da pega de 86, 80 e 50 minutos, respectivamente, enquanto que a ALV+ Pb 100 ppm+ SAT acelerou o início de pega em 34

minutos. Assim como para o zinco, o retardo no início de pega era esperado, uma vez que o chumbo também retarda o início de pega, pela dissolução do metal e diminuição da solubilidade do clínquer. As amostras mantiveram a mesma variação do tempo entre o início e o fim de pega das argamassas de referências, exceto a argamassa com 300 ppm de chumbo e realização da molhagem prévia (ALV+ Pb 300 ppm+ SAT), na qual foi observada uma redução do tempo entre o início e o fim de pega de 72 minutos.

Analisando a Figura 26 verificou-se que o teor de metal e a saturação prévia não influenciaram no calor de hidratação dessas amostras, pois, apresentaram praticamente o mesmo calor gerado (Figura 26-a) e a mesma curva do calor gerado acumulado (Figura 26-b). Porém, em relação às amostras de referência (ALV e ALV+SAT): a incorporação de cromo retardou o início de pega, em todos os casos; as argamassas sem a realização da molhagem prévia aumentaram o calor de hidratação; e nas argamassas com realização da molhagem prévia reduziu o calor de hidratação. Bem como, a incorporação de cromo nas argamassas reduziu o grau de hidratação em relação às referências.

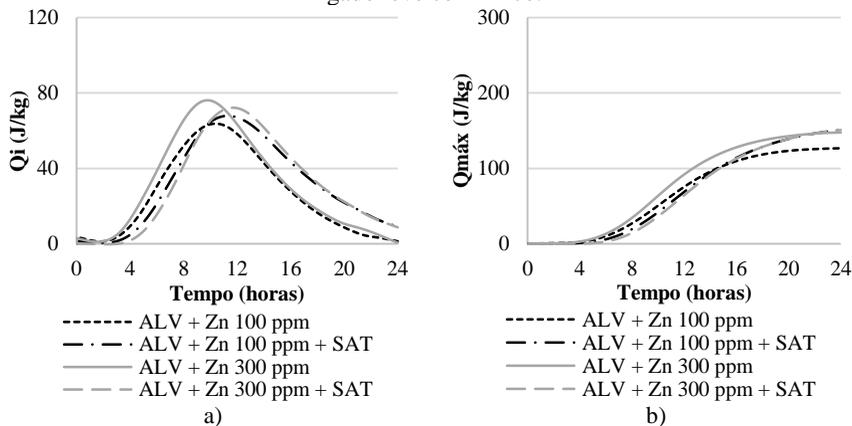
Figura 26: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de agregado leve com cromo.



Na Figura 27 percebe-se que nas argamassas com agregado leve e com o maior teor de zinco aumentou-se o calor gerado, em relação às amostras com 100 ppm. Nas argamassas referências (ALV e ALV+SAT), a incorporação de zinco, nos dois teores, retardou o início de pega, o mesmo foi observado nas argamassas com agregado reciclado e zinco. Bem como, o grau de hidratação e o acúmulo do calor gerado

(Figura 27-b) reduziram, em todos os casos, em relação às referências. As argamassas sem molhagem prévia aumentaram o calor de hidratação em relação a sua referência, enquanto que as argamassas com saturação prévia reduziram. As argamassas com saturação prévia reduziram a variação do tempo, do início até o fim de pega.

Figura 27: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de agregado leve com zinco.



De modo geral constatou-se que nas argamassas com agregado leve, a influência dos metais segue uma tendência de, em todos os casos, retardar a hidratação do cimento, devido à interferência dos metais (chumbo, cromo ou zinco) com o cimento, nos quais é formado um revestimento gelatinoso sobre a superfície dos grãos de cimento, pela formação de hidróxido de metais pesados (CHEN *et al.*, 2009; GINEYS, AOUAD e DAMIDOT, 2010 e 2011; SINYOUNG *et al.*, 2011). Além disso, a interação dos metais com os produtos de hidratação do cimento (C_3S , C_2S e C_3A) retarda a supersaturação de cálcio e, conseqüentemente, a precipitação da portlandita e do C-S-H, pela formação de novas fases (as quais consomem os íons de cálcio e oxigênio (CaO) para formar novas fases e somente após a completa formação destas novas fases ($CaCrO_4 \cdot H_2O$ e $CaZnSiO_4 \cdot H_2O$) é que ocorrerá a supersaturação de cálcio e a precipitação do C-S-H e a hidratação continuará), conforme comentando anteriormente e nos resultados do ensaio de DRX (item 5.3.2.5.3).

Quando o agregado natural foi substituído pelo agregado reciclado, a interferência na hidratação das amostras não seguiu a mesma tendência que as amostras com agregado leve, uma vez que nas amostras

sem saturação prévia a incorporação de 300 ppm de zinco e de chumbo acelerou a hidratação em 22 e 28 minutos, respectivamente, e nas amostras com molhagem prévia e incorporação de 300 ppm de chumbo e 300 ppm de zinco retardaram a hidratação em 26 e 58 minutos, respectivamente, e as demais amostras com agregado reciclado a incorporação de metal pesado não afetou a hidratação. Bem como, as argamassas com agregado reciclado e com saturação prévia dos agregados (REF+SAT e as amostras com incorporação de metais pesados) apresentaram início de pega praticamente constante e de acordo com o início da hidratação da argamassa AN (com exceção para a RCC+Zn 300 ppm+ SAT). Isso ocorreu porque o agregado reciclado funcionou como um sorvente químico, retendo o metal do seu interior nas primeiras horas de hidratação, tanto quando foi utilizado saturado previamente como quando utilizado seco previamente. Além do metal ter sido sorvido pelo agregado, pode ocorrer ligações químicas com os produtos de hidratação (C-S-H e etringita) presentes na superfície do agregado reciclado, conforme verificado no item 5.1.8 sobre caracterização microestrutural.

5.3.1.3 Conclusões parciais

As conclusões parciais, referente às características físicas das argamassas com substituição parcial do agregado natural por agregado reciclado ou leve e incorporação dos metais pesados no estado fresco, são as seguintes:

A incorporação de metais pesados nas argamassas influencia na microestrutura do material, com redução do teor de ar incorporado das argamassas (8,2 a 50,4 %). Isto é, o metal pesado incorporado (Pb, Cr ou Zn, nas duas proporções) impediu a formação de bolhas de ar na mistura. A trabalhabilidade, de todas as argamassas em relação à argamassa AN, foi reduzida em até 50,7 %, entretanto, dependendo da destinação final da argamassa isso não é um problema.

Nas argamassas fabricadas com substituição parcial do agregado natural por agregado reciclado ou agregado leve, em todos os casos, reduziu o consumo de cimento, sendo essa uma característica apreciável pela redução do custo e do impacto ambiental (pela redução da emissão de dióxido de carbono, CO₂).

A substituição parcial do agregado natural por agregado leve afetou significativamente o início de hidratação das argamassas, com atrasos de até 129 minutos. Já, nas argamassas com agregado reciclado o retardo da hidratação gerado não foi tão pronunciado e ocorreu em apenas sete amostras (RCC, RCC+ Pb100 ppm, RCC+ Cr100 ppm,

RCC+Zn 100 ppm, RCC+ Cr 300 ppm, RCC+ Pb 300 ppm+ SAT e RCC+ Zn 300 ppm+ SAT).

O agregado reciclado foi um sorvente químico eficaz para os três metais pesados estudados, e nas duas proporções, uma vez que nas argamassas com agregado reciclado os metais pesados não influenciaram na hidratação do cimento (com exceção para RCC+ Pb 300 ppm e RCC+Zn 300 ppm+ SAT), em relação às amostras RCC e RCC+SAT. O metal ficou absorvido e/ou adsorvido na estrutura do agregado.

Assim, conclui-se que a utilização do agregado reciclado, como sorvente químico no processo de solidificação/ estabilização de metais pesados, nas propriedades do estado fresco foi eficiente e benéfico, sem reduzir significativamente as propriedades em relação à argamassa com apenas agregado natural. Enquanto que a eficiência do agregado leve não pode ser comprovada.

5.3.2 Estado endurecido

5.3.2.1 Propriedade física

Na Tabela 26 estão dispostos os resultados de massa específica das argamassas com 28 dias de hidratação. Analisando os resultados nota-se que o teor de metal incorporado e a realização da cura interna não influenciaram na massa específica das argamassas. Entretanto, o tipo de agregado utilizado influenciou, devido à natureza dos agregados utilizados. Diferente da massa específica no estado fresco, a qual não foi influenciada pelo agregado utilizado, percebeu-se que com a cura interna o agregado reciclado aumentou o valor da massa específica, devido ao favorecimento da hidratação densificando a matriz. Já, as argamassas com agregado leve, não apresentaram alteração significativa no resultado da massa específica do estado fresco para o estado endurecido.

As argamassas fabricadas com substituição parcial (25 %) do agregado natural por agregado reciclado e por agregado leve, apresentaram redução da massa específica devido à redução da massa específica dos agregados, corroborando com Vegas *et al.* (2009), Neno, Brito e Veiga (2014) e Ledesma *et al.* (2014).

Tabela 26: Massa específica das argamassas no estado endurecido.

Material/ Argamassas	γ (g/cm ³)	Material/ Argamassas	γ (g/cm ³)	
REF-AN	2,20			
AN + RCC	REF	2,17	REF	2,04
	Pb 100 ppm	2,15	Pb 100 ppm	1,99
	Cr 100 ppm	2,13	Cr 100 ppm	2,03
	Zn 100 ppm	2,13	Zn 100 ppm	2,03
	Pb 300 ppm	2,18	Pb 300 ppm	2,02
	Cr 300 ppm	2,15	Cr 300 ppm	2,03
	Zn 300 ppm	2,13	Zn 300 ppm	1,93
	REF + SAT	2,15	REF + SAT	2,03
	Pb 100 ppm + SAT	2,17	Pb 100 ppm + SAT	1,96
	Cr 100 ppm + SAT	2,13	Cr 100 ppm + SAT	1,97
	Zn 100 ppm + SAT	2,16	Zn 100 ppm + SAT	1,97
	Pb 300 ppm + SAT	2,13	Pb 300 ppm + SAT	1,95
	Cr 300 ppm + SAT	2,17	Cr 300 ppm + SAT	1,91
	Zn 300 ppm + SAT	2,14	Zn 300 ppm + SAT	1,90
		AN + ALV		

Nota: γ = Massa específica; REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

5.3.2.2 Propriedades mecânicas

Os resultados do desvio padrão do ensaio de resistência á compressão e resistência à tração na flexão encontram-se no APÊNDICE 2.

5.3.2.2.1 Resistência à compressão

Na Tabela 27 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas após o período de hidratação de 1, 3, 7, 28 e 90 dias.

De modo geral percebeu-se que o tipo do agregado utilizado influenciou nos resultados. Isso era esperado, uma vez que, o agregado reciclado é oriundo da britagem de concreto e o agregado leve é proveniente de material argiloso, dessa forma a resistência à compressão foi limitada pela resistência dos agregados. Bem como, de acordo com Bentur, Igarashi e Kovler, (2001) e Zou e Weiss (2014), os quais estudaram argamassas com agregado leve, a redução da resistência das argamassas curadas internamente em idades precoces (7 dias ou mais cedo), é devido à porosidade do agregado leve, corroborando com os resultados encontrados nessa pesquisa para as idades de 3 e 7 dias das argamassas com agregado leve em relação à amostra AN. Uma vez que, com 1 dia

as resistências de todas as argamassas (com agregado leve e com agregado reciclado) foram superiores à REF-AN. Assim como, com 28 e 90 dias verificou-se que quanto maior o índice de vazios dos agregados menor foi a resistência das argamassas. Essa tendência não foi observada nas idades iniciais.

Tabela 27: Resistência à compressão das argamassas em cada idade.

Material/ Argamassas	Resistência à compressão (MPa)				
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
REF-AN	7,9	22,0	26,0	38,0	44,8
REF	15,3	24,3	24,6	32,4	37,0
Pb 100 ppm	15,7	23,3	26,0	32,1	35,1
Cr 100 ppm	14,5	20,8	25,3	27,6	33,8
Zn 100 ppm	14,4	21,3	24,2	28,0	28,2
Pb 300 ppm	16,2	23,9	28,5	30,7	37,4
Cr 300 ppm	14,9	23,0	26,5	32,3	33,7
Zn 300 ppm	14,1	21,1	26,0	29,5	33,4
REF + SAT	16,8	24,2	27,8	28,2	35,2
Pb 100 ppm + SAT	17,0	24,3	24,3	28,8	34,1
Cr 100 ppm + SAT	14,2	21,9	22,6	26,0	30,2
Zn 100 ppm + SAT	13,8	21,0	22,7	23,0	28,1
Pb 300 ppm + SAT	16,9	21,9	27,1	28,3	32,7
Cr 300 ppm + SAT	14,3	25,2	26,3	27,0	33,4
Zn 300 ppm + SAT	13,9	21,7	26,6	27,5	32,9
REF	13,1	19,9	22,1	27,3	32,7
Pb 100 ppm	7,8	18,4	20,3	27,3	32,1
Cr 100 ppm	12,5	20,2	20,7	25,5	27,1
Zn 100 ppm	11,6	17,0	21,3	26,5	27,2
Pb 300 ppm	6,5	18,3	21,1	24,7	31,1
Cr 300 ppm	10,9	19,3	21,3	26,5	31,7
Zn 300 ppm	7,7	15,8	16,6	23,4	26,4
REF + SAT	14,5	19,5	19,8	24,0	26,4
Pb 100 ppm + SAT	8,3	17,0	18,4	20,9	27,1
Cr 100 ppm + SAT	10,7	15,5	20,5	21,7	28,1
Zn 100 ppm + SAT	11,3	18,1	20,0	20,8	22,6
Pb 300 ppm + SAT	7,8	19,4	20,1	24,4	25,1
Cr 300 ppm + SAT	8,7	20,1	21,7	22,9	26,5
Zn 300 ppm + SAT	8,0	15,6	17,3	18,6	19,9

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

A menor resistência mecânica das argamassas REF-RCC e REF-ALV com 1 dia, em relação às amostras saturadas (RCC+SAT e ALV+SAT), foi causada pela menor quantidade de água disponível no sistema para a hidratação do cimento. Pois, como os agregados foram

adicionados secos, absorveram parte da água da mistura. Esta água por ser absorvida durante o preparo promoveu a hidratação do cimento em idades posteriores, causando o aumento da resistência aos 28 e 90 dias. Para He *et al.* (2014), após a hidratação por quase 28 dias, o efeito de liberação de água do agregado leve desempenha um papel importante na cura interna, o que favorece a zona interfacial entre os agregados e a pasta de cimento.

Já, a melhora da resistência das argamassas preparadas com o agregado saturado previamente em comparação com as amostras com o agregado seco previamente, em idades iniciais (1, 3 e 7 dias) é ocasionada pela cura interna. Uma vez que, ao saturar os agregados por 24 horas antes do preparo da argamassa, a água dos agregados porosos estará prontamente disponível para hidratar o cimento, liberando-a nas idades iniciais causando o aprimoramento da ZTI (deixando-a menos porosa e permeável, com mais produtos hidratados, conforme verificado na análise de MEV, item 5.3.2.5) e aumento do grau de hidratação (observado no ensaio de calor de hidratação e de RMN) das argamassas.

Além da cura interna, o aumento da resistência se deve ao refinamento da microestrutura da ZTI e pela ancoragem da pasta de cimento com o agregado poroso. Conforme observado no ensaio de MEV (item 5.3.2.5), a pasta entrou nos poros maiores dos agregados porosos, aumentando a ligação entre a pasta e o agregado. O aumento da resistência à compressão das argamassas com agregado leve foi limitado pela resistência do agregado. Uma vez que, na argamassa com agregado leve, a falha ocorreu antes nos agregados do que na pasta (BOGAS, BRITO e FIGUEIREDO, 2015; VARGAS *et al.*, 2017).

Em todas as idades analisadas, as resistências das argamassas com agregados reciclados foram superiores às argamassas com agregado leve. Isso ocorreu pela maior área específica (determinada pelo ensaio de isotermas, item 5.1.3), pelo menor índice de vazios, pela quantidade de cimento anidro presente no agregado reciclado que completa a sua reação hidráulica em contato com a água, pela maior resistência do agregado reciclado e pelas partículas de cimento aderidas no agregado reciclado que auxiliam na melhor ligação interfacial entre os agregados e a pasta de cimento (CORINALDESI e MORICONI, 2009; NENO, BRITO e VEIGA, 2014).

A redução da resistência das argamassas com agregado poroso (ALV ou RCC), em idades tardias, em comparação com a amostra com apenas agregado natural (REF-AN), ocorreu pela menor relação a/c. Uma vez que, nas argamassas com agregado poroso, a relação a/c efetiva foi inferior pela absorção dos agregados e uma parte dessa água pode

ter sido retida nos poros muito pequenos dos grãos ou a entrada de algum grão de cimento nos poros impediu que essa água fosse liberada para a hidratação do cimento. Assim, a quantidade de água disponível se torna inferior à quantidade necessária para uma completa hidratação do cimento. Dessa forma, a redução da resistência das argamassas com agregado reciclado e com agregado leve é devido às resistências mecânicas dos agregados, uma vez que o agregado natural é mais resistente que os agregados porosos utilizados.

A incorporação de metal pesado (chumbo, cromo e zinco) nas argamassas com agregado reciclado, não influenciou, consideravelmente, na resistência à compressão, como observado no ensaio de calor de hidratação (item 5.3.1.2). Devido à sorção do metal pesado nos grãos do agregado reciclado, não foi observado a influencia dos metais, principalmente nas idades iniciais. O oposto foi observado para as argamassas com agregado leve, ou seja, as argamassas com agregado leve não foram eficazes como sorvente químico, sendo explicado pela quantidade e pelo tamanho dos seus poros.

Percebeu-se que as argamassas com agregado reciclado e incorporação de chumbo (nos dois teores e com 0 e 100 % de saturação do agregado), com 1 e 3 dias de hidratação, apresentaram resistências à compressão superiores à argamassa com apenas agregado natural. Bem como, quando adicionado zinco (nos dois teores e com 0 e 100 % de saturação do agregado) reduziu a resistência com 3 dias de hidratação. Já, em relação às argamassas com agregado leve, com 3 dias de hidratação, todas apresentaram resistência inferiores à REF-AN. Os resultados obtidos nessa pesquisa, divergem da literatura, pois Gineys, Auouad e Damidot (2010), estudaram pastas de cimento com incorporação de metais pesados (Cd, Pb, Cu e Zn) com relação a/c 0,5 e perceberam que as pastas de cimento com 2 dias de hidratação, apresentavam resistências à compressão inferiores à referência quando incorporado chumbo, bem como quando utilizado zinco, a resistência ficou próxima à zero, devido ao atraso na hidratação e a interferência dos metais com os produtos hidratados do cimento.

A redução das resistências, quando incorporado os metais pesados, pode ser explicado pela inibição da hidratação causada pelos metais pesados, ocasionando menor teor de C-S-H e Ca(OH)₂ pela reação dos metais com o C₃S e C₂S, conforme verificado no ensaio de NMR e DRX (item 5.3.2.5.2 e 5.3.2.5.3, respectivamente). Além disso, no ensaio de MEV (item 5.3.2.5) verificou-se uma redução dos produtos de hidratação em relação à amostra referência. Estando de acordo com os resultados de Sinyoung *et al.* (2011).

Na Tabela 28, têm-se o aumento proporcional da resistência à compressão em cada idade analisada.

Tabela 28: Porcentagem de aumento da resistência à compressão.

Material/ Argamassas	Aumento da resistência (%)			
	1 p/ 3 d	3 p/ 7 d	7 p/ 28 d	28 p/ 90 d
REF-AN	178,5	18,1	45,8	17,9
REF	58,4	1,5	31,5	14,2
Pb 100 ppm	48,5	11,4	23,5	9,4
Cr 100 ppm	43,6	21,7	9,2	22,4
Zn 100 ppm	48,2	13,4	16,0	0,7
Pb 300 ppm	47,3	19,4	7,6	22,0
Cr 300 ppm	54,2	15,5	21,9	4,3
Zn 300 ppm	49,5	23,3	13,3	13,1
REF + SAT	43,7	14,8	1,4	24,9
Pb 100 ppm + SAT	43,4	1,9	16,1	18,6
Cr 100 ppm + SAT	53,9	3,1	15,3	15,9
Zn 100 ppm + SAT	52,6	8,1	1,2	22,3
Pb 300 ppm + SAT	29,2	24,0	4,2	15,8
Cr 300 ppm + SAT	76,1	4,4	2,6	23,7
Zn 300 ppm + SAT	55,9	22,7	3,1	19,9
REF	52,0	11,0	23,4	19,8
Pb 100 ppm	136,1	10,3	34,6	17,6
Cr 100 ppm	62,2	2,5	23,1	6,2
Zn 100 ppm	45,7	25,7	24,3	2,5
Pb 300 ppm	181,6	14,9	17,5	25,7
Cr 300 ppm	77,1	10,4	24,2	19,8
Zn 300 ppm	104,9	5,2	41,1	12,9
REF + SAT	34,7	1,9	21,1	9,6
Pb 100 ppm + SAT	105,2	8,1	13,6	29,8
Cr 100 ppm + SAT	44,8	32,1	6,0	29,4
Zn 100 ppm + SAT	59,5	10,6	4,1	8,7
Pb 300 ppm + SAT	149,3	3,6	21,5	2,9
Cr 300 ppm + SAT	132,0	7,8	5,7	15,4
Zn 300 ppm + SAT	95,7	10,9	7,6	7,1

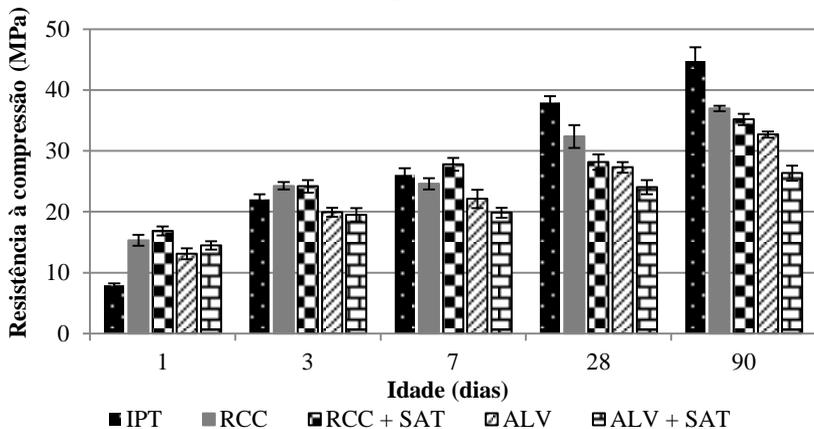
Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

O maior aumento da resistência ocorreu no período inicial de 1 para 3 dias de hidratação em todas as argamassas. O agregado leve desenvolve a resistência à compressão mais rapidamente na fase inicial chegando a valores de 182 % de aumento de 1 para 3 dias, corroborando com o observado por He *et al.* (2014), devido à densificação da ZTI pela absorção do agregado leve. Bem como, a REF-AN apresenta um aumento de resistência de 178 % de 1 para 3 dias, porém esse ganho de resis-

tência só faz com que essa argamassa apresente resistência comparável as demais amostras com agregado poroso com 3 dias. Essa menor resistência da REF-AN com 1 dia, é causada pela maior quantidade de água na amostra, uma vez que o agregado não é absorvente, e essa água cria pontos de fraqueza na argamassa. Já, com três dias essa água já foi ligada com os produtos do cimento, aumentando a hidratação e consequentemente a resistência (Tabela 28).

Na Figura 28 a Figura 34 estão dispostos os gráficos de resistência à compressão, separados por agregado e metal utilizado.

Figura 28: Resistência à compressão das amostras referências ao longo do tempo.

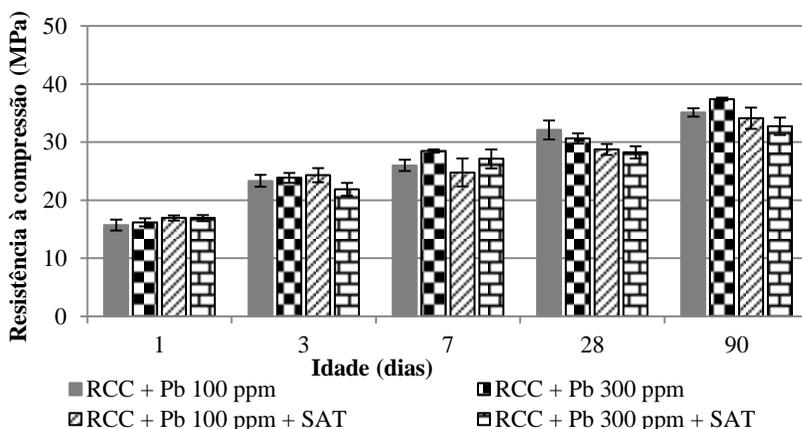


Sobre as argamassas referências (Figura 28), percebeu-se que a realização da molhagem prévia do agregado reciclado melhorou a resistência do material até a idade de 7 dias de hidratação. Entretanto, em idades posteriores, a argamassa com agregado reciclado sem molhagem prévia ultrapassou a resistência da RCC+SAT, indicativo que a liberação da água do agregado reciclado com molhagem prévia ocorreu nas primeiras idades, melhorando a hidratação. Já, nas argamassas com agregado leve, a resistência foi semelhante entre as argamassas, REF-ALV e ALV+SAT, com 1 e 3 dias, reduzindo-a com o aumento do tempo. Isto pode ter ocorrido pois, nas argamassas sem realização da molhagem prévia, os agregados leves e reciclados absorveram parte da água de amassamento e essa água foi liberada em idades tardias, auxiliando no aumento da resistência, corroborando com Golias, Castro e Weiss (2012).

Dapena *et al.* (2011) obtiveram reduções de 14 % da resistência à compressão quando substituíram a areia natural por 20 % de agregado reciclado de concreto aos 28 dias. O mesmo foi encontrado nesse trabalho quando o agregado reciclado foi adicionado seco (REF-RCC) e quando saturado (RCC+SAT) a redução foi, praticamente, 26%.

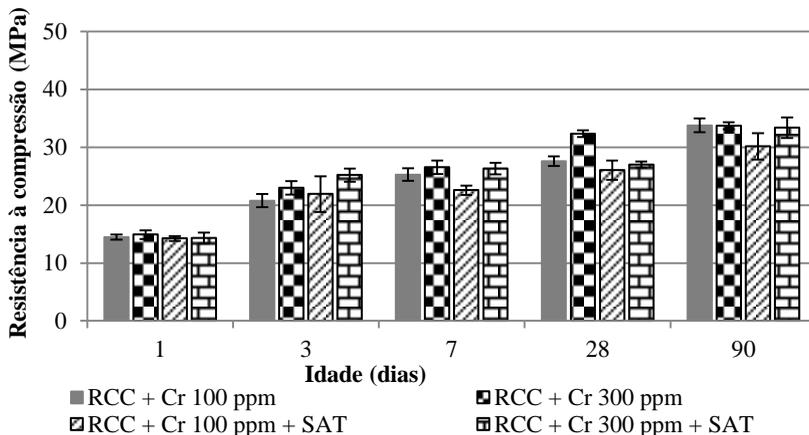
Na Figura 29, são apresentados os resultados das argamassas com o agregado reciclado e incorporação de chumbo. A resistência não foi alterada pela realização da cura interna e pela incorporação do metal pesado.

Figura 29: Resistência à compressão das amostras de agregado reciclado com chumbo ao longo do tempo.



Os resultados de resistência à compressão com agregado reciclado e incorporação de cromo são apresentados na Figura 30. Verificou-se que, com um dia de hidratação as argamassas apresentaram praticamente a mesma resistência. Com 3 dias de hidratação, as argamassas produzidas com a realização da molhagem prévia ultrapassaram o valor da resistência das argamassas preparadas com o agregado seco. Entretanto, com 28 dias de hidratação ocorreu o oposto. O mesmo comportamento verificado nas argamassas de referência, no qual em idades tardias o agregado adicionado seco previamente libera a água do seu interior e auxilia para uma melhor hidratação.

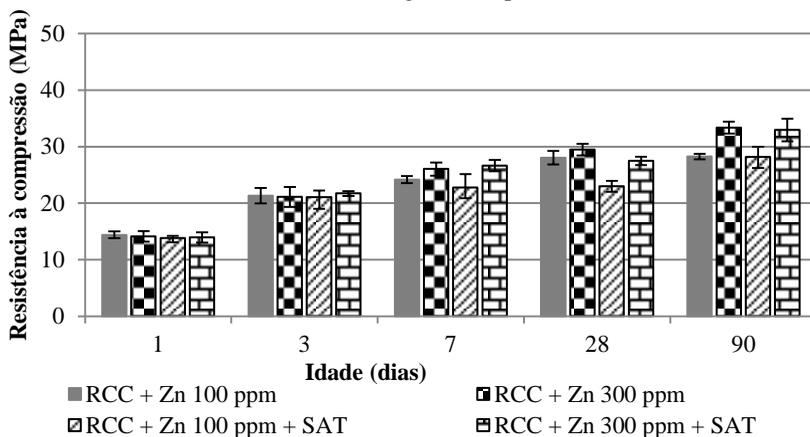
Figura 30: Resistência à compressão das amostras de agregado reciclado com cromo ao longo do tempo.



Constata-se na Figura 31 que a realização da molhagem prévia e o aumento do teor de zinco nas argamassas aumentaram a resistência. Confrontando os resultados das argamassas com incorporação de zinco com as argamassas de referências, verificou-se que as argamassas sem molhagem prévia apresentaram resistências semelhantes até os 7 dias, com abrupta redução nas idades posteriores. Já, nas argamassas com molhagem prévia, a amostra com 100 ppm apresentou resistência inferior em todas as idades, assim como nas argamassas com 300 ppm com 1 e 3 dias, passado esse período, a resistência dessas argamassas se igualaram a referência.

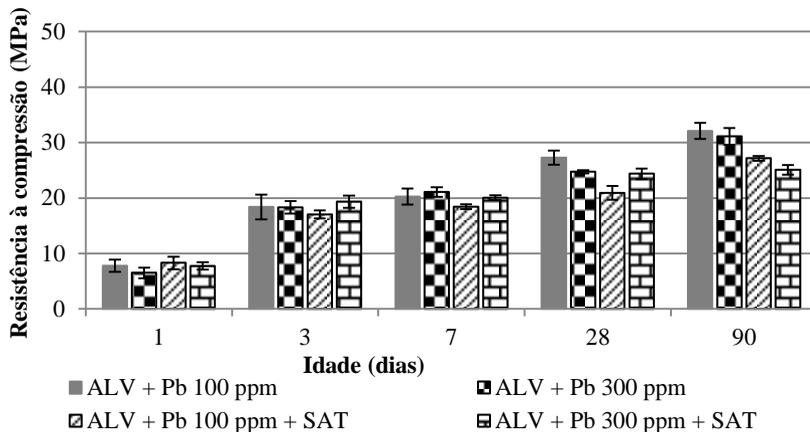
Do mesmo modo, nas amostras com incorporação de zinco, o teor foi um fator relevante, principalmente, em idades posteriores (90 dias). Pois, as argamassas com 300 ppm de zinco, apresentaram um aumento na resistência em torno de 15 %, em relação às argamassas com 100 ppm. Isto é, com o aumento da hidratação, o metal pesado favoreceu o ganho de resistência nas argamassas pelo efeito de tamponamento dos poros com produtos hidratados contaminados, e na ZTI reduzindo a porosidade e a permeabilidade.

Figura 31: Resistência à compressão das amostras de agregado reciclado com zinco ao longo do tempo.



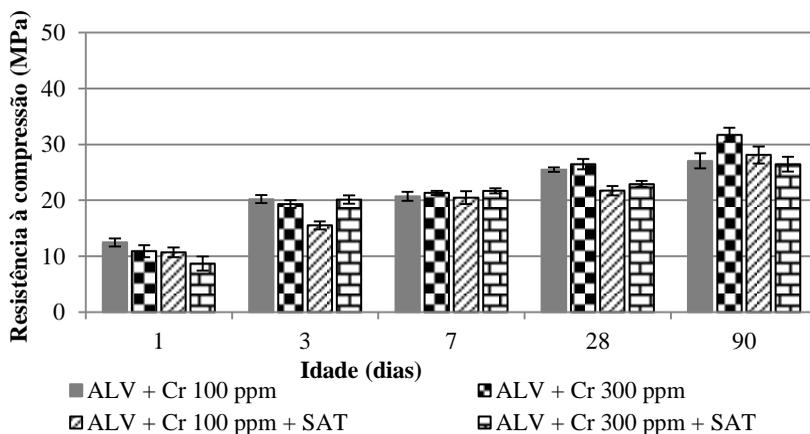
As resistências à compressão das argamassas com agregado leve e incorporação de chumbo estão na Figura 32. O teor de metal não influenciou no desempenho do material. Entretanto, a realização da molhagem prévia reduziu a resistência com 28 e 90 dias, em relação às amostras sem molhagem prévia (mesmo comportamento observado nas referências). Relacionando essas argamassas com as suas referências respectivas, evidenciou-se uma redução da resistência com 1 dia de hidratação, ou seja, a incorporação de chumbo reduziu consideravelmente a resistência das argamassas por influencia do metal com os produtos hidratados da pasta de cimento, comprovado pelo retardo da hidratação observado no ensaio de calor de hidratação. Passado esse período, as resistências se igualaram, pois após cessar o teor de chumbo, começa a precipitar o C-S-H e a hidratação continua, com o desenvolvimento da resistência.

Figura 32: Resistência à compressão das amostras de agregado leve com chumbo ao longo do tempo.



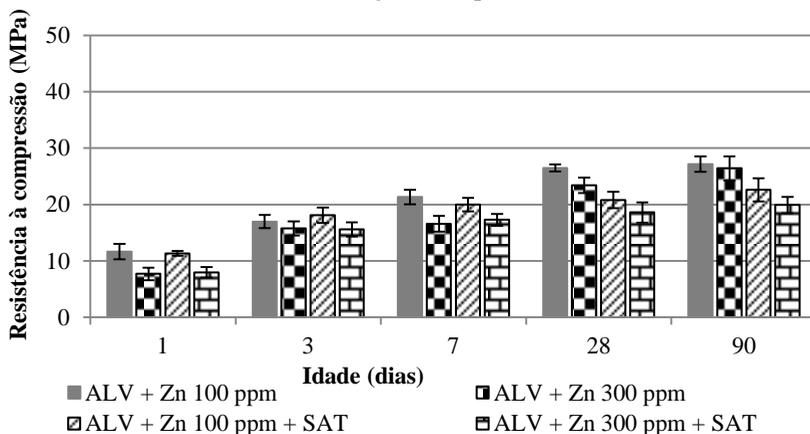
Na Figura 33 verifica-se que o teor e a saturação do agregado não influenciaram na resistência das argamassas, uma vez que, apresentaram praticamente a mesma resistência. As argamassas sem realização da molhagem prévia apresentaram resultados de resistência semelhantes à sua argamassa de referência (REF-ALV). Já, nas argamassas realizadas a molhagem prévia, a resistência foi inferior com 1 e 3 dias, após esse período se igualaram a referência (ALV+SAT).

Figura 33: Resistência à compressão das amostras de agregado leve com cromo ao longo do tempo.



A realização da molhagem prévia nas argamassas com agregado leve e incorporação de zinco resultou em resistências similares até os 7 dias de hidratação. Passado este período, a resistência reduziu, bem como, o aumento do teor de zinco (de 100 para 300 ppm) também reduziu a resistência. Nas argamassas com 100 ppm de zinco, com e sem a realização da molhagem prévia, a resistência à compressão foi semelhante à referência até os 28 dias. Agora, nas argamassas com 300 ppm, com ou sem molhagem prévia, houve perda de resistência em relação à referência (Figura 34).

Figura 34: Resistência à compressão das amostras de agregado leve com zinco ao longo do tempo.



Com a realização da análise estatística ANOVA nos resultados, evidenciou-se que, com 95 % de confiabilidade, a resistência à compressão das argamassas com 1, 3 e 7 dias hidratação são influenciadas pelo teor de metal pesado e pelo tipo de agregado utilizado. Já com 28 e 90 dias de hidratação, a resistência à compressão foi afetada por todos os fatores estudados, ou seja, o tipo do agregado, o teor do metal, o metal utilizado e a realização da molhagem prévia (resultados brutos apresentados no APÊNDICE 1).

5.3.2.2.2 Resistência à tração na flexão

Os resultados de resistência à tração na flexão das argamassas após o período de hidratação de 1, 3, 7, 28 e 90 dias são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29: Resistência à tração na flexão das argamassas em cada idade.

	Material/ Argamassas	Resistência à tração na flexão (MPa)				
		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
AN + RCC	REF-AN	2,0	5,0	6,2	7,5	9,0
	REF	3,6	5,4	5,6	6,4	7,6
	Pb 100 ppm	4,1	5,7	6,3	7,2	7,4
	Cr 100 ppm	3,6	6,0	6,2	7,1	7,5
	Zn 100 ppm	3,9	5,2	6,2	6,7	7,1
	Pb 300 ppm	4,4	5,3	7,3	7,6	8,0
	Cr 300 ppm	4,2	6,1	6,4	7,4	8,1
	Zn 300 ppm	4,1	5,9	7,0	7,6	8,8
	REF + SAT	4,1	5,6	5,8	6,4	8,2
	Pb 100 ppm + SAT	4,5	5,7	6,1	6,9	7,5
	Cr 100 ppm + SAT	3,3	5,3	6,2	6,5	6,9
	Zn 100 ppm + SAT	3,4	5,4	5,9	6,3	7,6
	Pb 300 ppm + SAT	4,6	5,1	5,8	6,6	8,4
	Cr 300 ppm + SAT	3,6	6,4	6,6	7,0	7,8
	Zn 300 ppm + SAT	3,3	5,4	6,4	7,1	8,2
	AN + ALV	REF	3,9	5,0	5,9	6,9
Pb 100 ppm		2,1	5,3	5,7	6,9	7,0
Cr 100 ppm		3,8	6,0	6,3	7,5	8,0
Zn 100 ppm		2,9	5,1	6,2	6,6	7,8
Pb 300 ppm		2,7	5,0	5,7	6,9	8,0
Cr 300 ppm		3,7	5,8	6,0	6,5	8,3
Zn 300 ppm		2,8	5,1	5,3	6,0	8,1
REF + SAT		3,9	5,2	5,5	6,8	7,8
Pb 100 ppm + SAT		2,7	4,6	5,3	6,5	6,8
Cr 100 ppm + SAT		3,4	5,0	6,3	7,1	8,7
Zn 100 ppm + SAT		3,8	4,9	6,2	6,4	7,6
Pb 300 ppm + SAT		2,8	4,9	5,7	6,5	6,8
Cr 300 ppm + SAT		2,9	4,0	4,7	5,2	6,6
Zn 300 ppm + SAT		3,2	4,4	5,6	5,8	6,2

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

Verificou-se que a resistência à tração das argamassas com agregado reciclado e com agregado leve apresentaram valores semelhantes com a argamassa produzida com apenas agregado natural, nas idades de 3, 7, 28 e 90 dias, com algumas argamassas apresentando resistências superiores à REF-AN, até os 28 dias. Bem como, com 1 dia de hidratação, todas as amostras apresentaram resistência superior à REF-AN, com aumentos de 65 a 130 % para as argamassas com agregado reciclado e de 5 a 95 % para as argamassas com agregado leve. O aumento mais pronunciado, quando utilizado o agregado reciclado é atribuído à sorção do agregado, que auxiliou para que o metal pesado não afetasse a

hidratação das argamassas. Além disso, o metal auxiliou na melhora da resistência pelo preenchimento de poros com os produtos hidratados contaminados. Já, nas argamassas com agregado leve, as maiores resistências foram para a REF-ALV e ALV+SAT, uma vez que quando incorporado o metal pesado, houve interferência do metal na hidratação dessas amostras.

A melhora da resistência à tração na flexão e/ou as resistências comparáveis das argamassas com agregado poroso (RCC e ALV) em relação à amostra AN, ocorreu pela melhora causada na ZTI, devido à cura interna e pela penetração dos produtos de hidratação do cimento nos poros do agregado leve, agindo como “ganchos” ligando a matriz e o agregado, ou seja, um entrelaçamento mecânico (conforme observado no ensaio de MEV), corroborando com Vargas *et al.* (2017). Atribui-se o efeito benéfico, também, a presença da argamassa de cimento ligada no agregado reciclado, que promove uma melhor ligação entre o agregado reciclado e a nova pasta de cimento, além de que, a superfície áspera do agregado reciclado melhorou ainda mais a microestrutura da ZTI e aumentou a resistência à tração (KOU e POON, 2008; DUAN e POON, 2014).

Na Tabela 30 têm-se a porcentagem de aumento da resistência à tração na flexão. As argamassas com os maiores aumentos foram às amostras REF-AN e ALV+ Pb 100 ppm, nas quais de 1 para 3 dias houve um aumento superior a 150 %. Esse aumento tão pronunciado ocorreu pois, assim como na resistência à compressão, a resistência à tração na flexão da argamassa REF-AN, com 1 dia, foi inferior às demais amostras. Por outro lado, aos 3 dias as resistências se tornam equiparáveis. A resistência da argamassa REF-AN demorou mais para se desenvolver, em comparação com as demais amostras com agregado poroso, bem como a ALV+ Pb 100 ppm, pela interferência do metal com os produtos hidratados do cimento, que retardou a hidratação e o desenvolvimento da resistência mecânica.

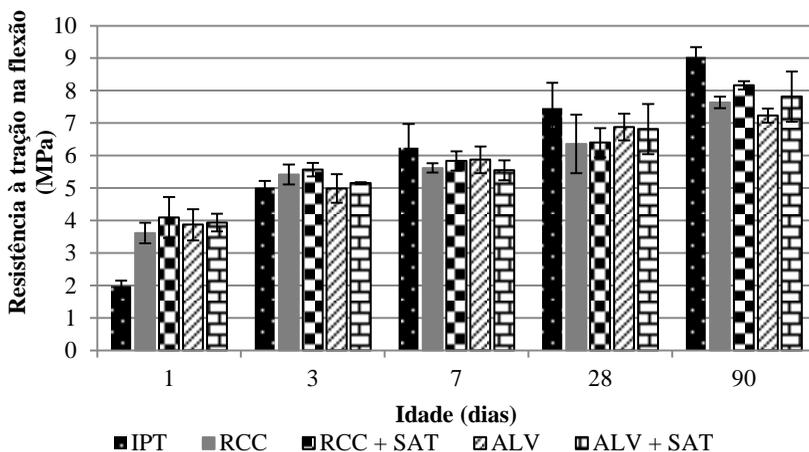
Tabela 30: Porcentagem de aumento da resistência à tração na flexão.

Material/ Argamassas	Aumento da resistência (%)			
	1 p/ 3 d	3 p/ 7 d	7 p/ 28 d	28 p/ 90 d
REF-AN	152,6	24,4	19,5	21,1
REF	50,0	3,6	13,2	20,1
Pb 100 ppm	39,8	10,4	14,6	3,7
Cr 100 ppm	65,0	3,9	13,7	6,3
Zn 100 ppm	34,9	17,9	8,5	5,5
Pb 300 ppm	21,4	37,8	4,6	5,0
Cr 300 ppm	43,6	5,5	15,5	9,6
Zn 300 ppm	42,4	19,9	7,4	15,8
REF + SAT	36,0	4,9	9,6	27,6
Pb 100 ppm + SAT	24,6	7,6	12,8	9,5
Cr 100 ppm + SAT	57,9	17,7	5,1	5,6
Zn 100 ppm + SAT	55,9	10,1	7,0	20,8
Pb 300 ppm + SAT	10,2	14,1	12,2	28,7
Cr 300 ppm + SAT	80,2	2,6	5,7	12,1
Zn 300 ppm + SAT	62,1	18,9	10,3	14,9
REF	28,9	17,7	17,2	5,1
Pb 100 ppm	155,2	8,2	20,1	1,3
Cr 100 ppm	55,6	5,8	18,3	7,0
Zn 100 ppm	76,9	21,3	6,0	19,1
Pb 300 ppm	86,7	13,8	21,4	15,9
Cr 300 ppm	58,0	3,2	8,6	26,6
Zn 300 ppm	81,8	5,0	13,9	33,6
REF + SAT	30,8	7,7	22,9	14,7
Pb 100 ppm + SAT	70,3	13,5	24,1	4,4
Cr 100 ppm + SAT	47,3	25,5	13,2	22,6
Zn 100 ppm + SAT	29,6	25,2	3,2	18,8
Pb 300 ppm + SAT	79,3	15,9	13,3	4,9
Cr 300 ppm + SAT	38,1	16,3	10,6	27,7
Zn 300 ppm + SAT	37,9	27,7	3,7	5,6

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

Na Figura 35 a Figura 41 são apresentados os resultados de resistência à tração na flexão das argamassas com agregado reciclado e agregado leve.

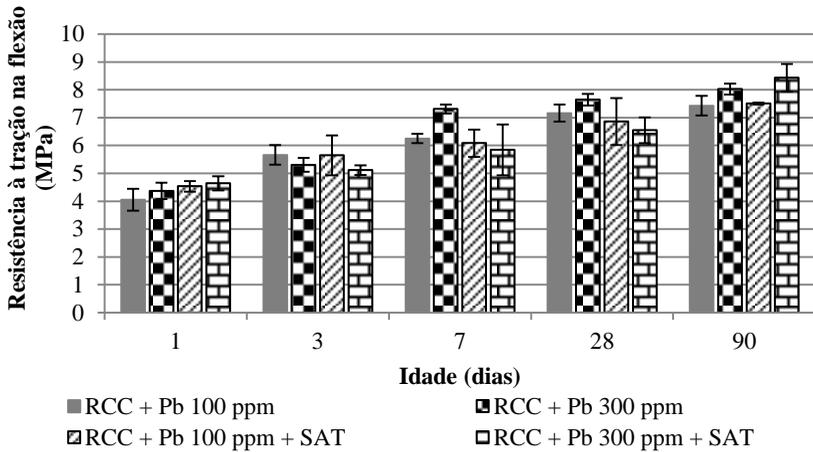
Figura 35: Resistência à tração na flexão das amostras de referências ao longo do tempo.



Na Figura 35 estão os resultados de resistência das argamassas de referência. Os resultados de todas as argamassas ficaram próximos, com um leve aumento da resistência nas argamassas SAT. Verificou-se um aumento expressivo com 1 dia de hidratação, de 5 a 130 %, das argamassas com agregado poroso em relação à REF-AN, comportamento semelhante observado para a resistência à compressão. Isso ocorreu, pois, a relação a/c efetiva das argamassas com agregado poroso foram 0,38 para as argamassas com agregado reciclado e 0,37 para as argamassas com agregado leve, enquanto que na REF-AN a relação a/c foi de 0,5, uma vez que, o agregado natural apresenta absorção inferior a 1 %. Essa diferença na relação a/c influenciou mais intensamente nas idades iniciais, pois a REF-AN apresentou um teor maior de água livre na mistura e um maior volume de vazios, criando pontos menos resistentes na argamassa, facilitando a propagação de fissuras.

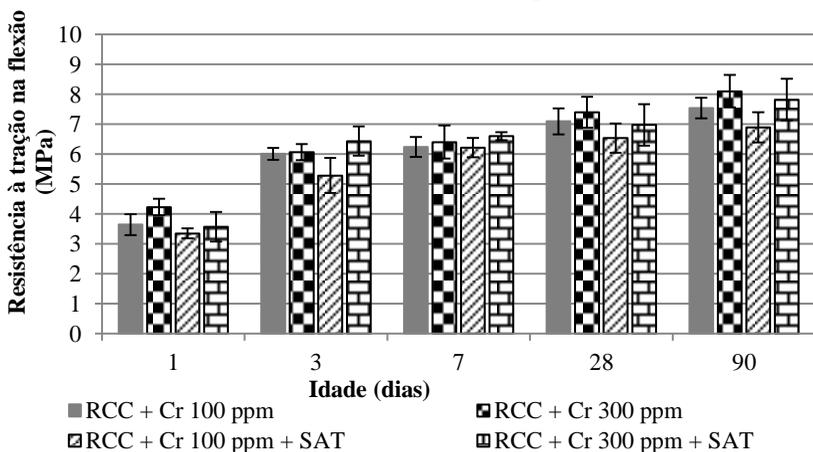
Na Figura 36 percebe-se que as argamassas com agregado reciclado e incorporação de chumbo não foram afetadas pela realização da saturação prévia do agregado ou pelo aumento do teor de chumbo, apresentando resistências semelhantes, exceto no caso da argamassa com 300 ppm com 7 dias de hidratação e nas argamassas com 300 ppm com e sem saturação prévia com 90 dias de hidratação. Relacionando as argamassas com chumbo com as referências, percebe-se que as resistências não variaram significativamente.

Figura 36: Resistência à tração na flexão das amostras de agregado reciclado com chumbo ao longo do tempo.



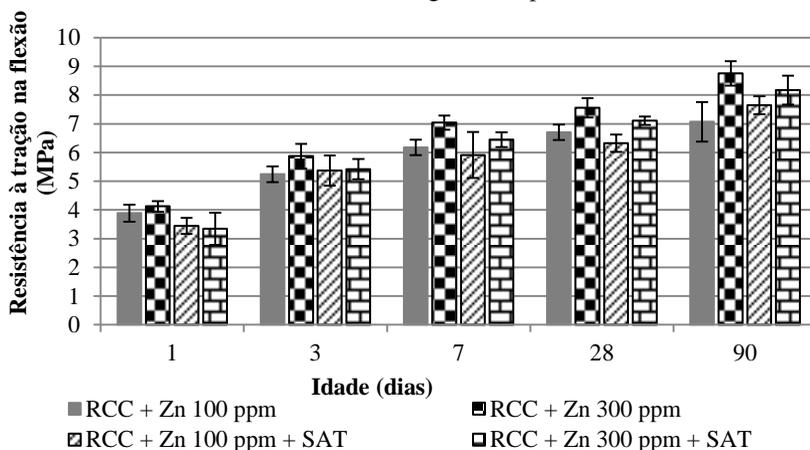
As argamassas com cromo e agregado reciclado foram alteradas pelo aumento do teor do metal, apenas com 90 dias de hidratação, nos outros períodos de hidratação avaliados, as resistências foram semelhantes e a saturação prévia resultou na diminuição das resistências, quando utilizado 100 ppm do metal. Comparando-se as argamassas com cromo com suas respectivas referências, verifica-se que a incorporação do metal não afetou a resistência à tração na flexão (Figura 37).

Figura 37: Resistência à tração na flexão das amostras de agregado reciclado com cromo ao longo do tempo.



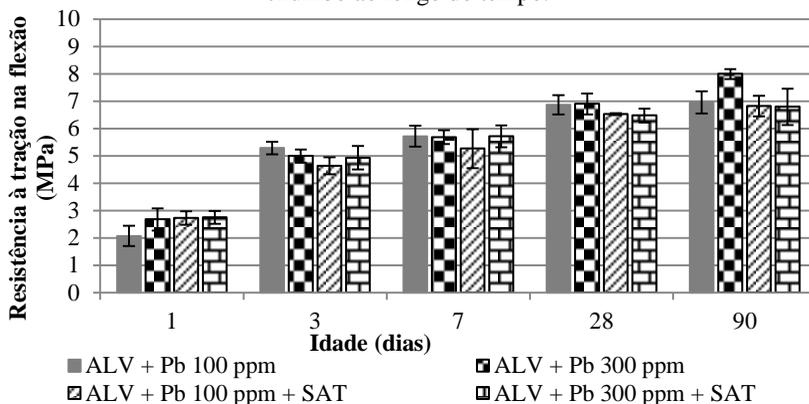
As argamassas com agregado reciclado e incorporação de zinco foram afetadas pelo teor de metal pesado, sendo que, as argamassas produzidas com o maior teor (300 ppm) apresentaram as maiores resistências. Ao relacionar as argamassas com zinco com as referências, observa-se resultados semelhantes, com alteração apenas na argamassa com 300 ppm (RCC+Zn 300 ppm). Uma vez que, a amostra RCC+Zn 300 ppm apresentou resistência semelhante à REF-AN com 28 e 90 dias e nas idades iniciais até 7 dias apresentou resistências superiores (Figura 38).

Figura 38: Resistência à tração na flexão das amostras de agregado reciclado com zinco ao longo do tempo.



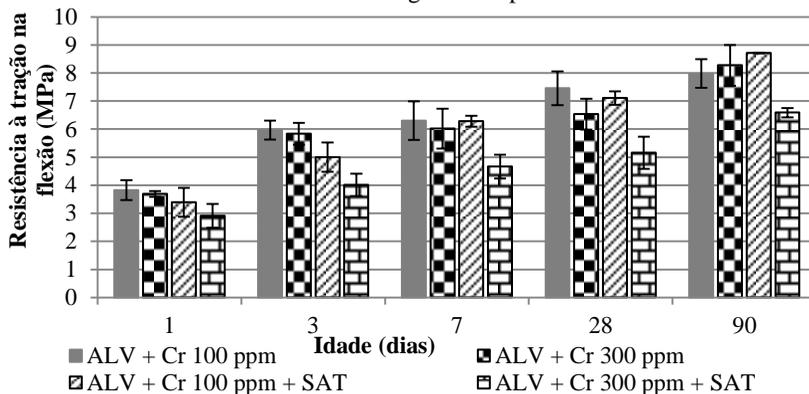
Na Figura 39 são apresentados os resultados das argamassas com agregado leve e chumbo. O aumento do teor de metal e a realização da saturação prévia, não afetaram a resistência dessas argamassas, exceto no caso da argamassa com 300 ppm (ALV+ Pb 300 ppm) com 90 dias de hidratação, o mesmo comportamento foi observado nas argamassas com agregado reciclado e incorporação de chumbo. Quando comparados os valores de resistência dessas argamassas com as referências, percebeu-se que os valores foram semelhantes, apenas variando para a argamassa com saturação prévia (100 e 300 ppm) e 90 dias de hidratação.

Figura 39: Resistência à tração na flexão das amostras de agregado leve com chumbo ao longo do tempo.



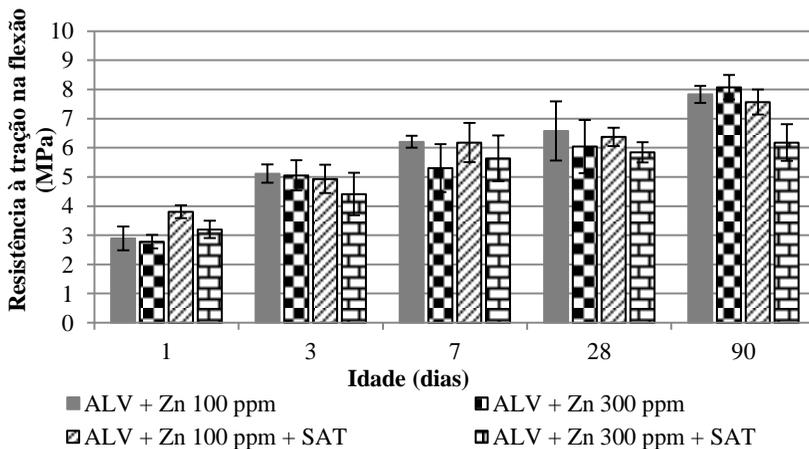
Verificou-se que, as argamassas com agregado leve, cromo e sem molhagem prévia apresentaram resultados semelhantes, enquanto que, a argamassa com 300 ppm com realização da saturação prévia dos agregados (ALV+ Cr 300 ppm+ SAT) apresentou a menor resistência em todas as idades. Relacionando essas argamassas com as suas referências, percebeu-se que as argamassas com 100 ppm e 300 ppm apresentaram valores semelhantes, exceto aos 90 dias com 300 ppm em que aumentou a resistência. Bem como, nas argamassas com saturação prévia com 100 ppm aos 90 dias de hidratação a resistência aumentou. Já, na argamassa com 300 ppm+ SAT a resistência foi inferior em todas as idades analisadas (Figura 40).

Figura 40: Resistência à tração na flexão das amostras de agregado leve com cromo ao longo do tempo.



A incorporação de zinco nas argamassas com agregado leve e realização da saturação prévia não alteraram os resultados de resistência à tração na flexão, uma vez que essas argamassas apresentaram resistência semelhantes em todos os períodos de hidratação (com exceção para a argamassa com incorporação de 300 ppm e saturação prévia com 90 dias, na qual a resistência reduziu), o mesmo ocorreu quando comparado essas argamassas com as suas respectivas referências (Figura 41).

Figura 41: Resistência à tração na flexão das amostras de agregado leve com zinco ao longo do tempo.



Para esclarecer sobre os efeitos estudados (saturação prévia, tipo de agregado, teor e metal utilizado) na resistência à tração na flexão, realizou-se análise estatística (ANOVA) entre as amostras nas diferentes idades de hidratação. Pode-se afirmar com 95 % de confiabilidade que a natureza do agregado e o teor de metal pesado utilizado influenciaram nos resultados de resistência à tração na flexão das argamassas com 1, 3, 7 e 28 dias. Já, o tipo do metal e a realização da molhagem prévia não influenciaram nas idades de 1, 3, 7 e 90 dias de hidratação. Isto é, aos 28 dias de hidratação todos os fatores influenciaram na resistência à tração na flexão, e com 90 dias nenhum efeito estudado influenciou. Os dados brutos da ANOVA estão expostos no Apêndice 1.

5.3.2.2.3 Variação dimensional

A variação dimensional foi verificada apenas nas amostras de referência (AN, RCC, RCC+SAT, ALV e ALV+SAT) e nas amostras com

a incorporação de 300 ppm de metal (chumbo, cromo e zinco), para verificar a maior interferência do metal nas argamassas. A retração por secagem decorre da redução do volume pela evaporação da água dos poros da argamassa para o ambiente, ou seja, se os poros da argamassa estiverem saturados, menor será a retração. A partir dos dados experimentais determinou-se a equação da curva para cada argamassa e foi estabelecido à variação dimensional nas idades de 3, 7, 28 e 90 dias, conforme Tabela 31.

Tabela 31: Equação das curvas e variação dimensional das argamassas em diferentes idades.

Argamassas	R ²	Equação da curva	Variação dimensional (mm/m)			
			3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
REF-AN	0,985	$y = -0,0071x + 0,266$	-0,021	-0,050	-0,199	-0,639
REF	0,833	$y = -0,0059x + 0,320$	-0,018	-0,041	-0,165	-0,531
Pb 300	0,952	$y = -0,136\ln(x) + 0,418$	-0,149	-0,265	-0,453	-0,612
Cr 300	0,971	$y = -0,118\ln(x) + 0,341$	-0,130	-0,230	-0,393	-0,531
Zn 300	0,924	$y = -0,117\ln(x) + 0,226$	-0,129	-0,228	-0,390	-0,526
REF+SAT	0,987	$y = -0,074\ln(x) + 0,146$	-0,081	-0,144	-0,247	-0,333
Pb + SAT	0,870	$y = -0,145\ln(x) + 0,466$	-0,159	-0,282	-0,483	-0,652
Cr + SAT	0,656	$y = -0,075\ln(x) - 0,08$	-0,165	-0,229	-0,333	-0,420
Zn + SAT	0,924	$y = -0,104\ln(x) - 0,024$	-0,139	-0,227	-0,371	-0,493
REF	0,947	$y = -0,0046x + 0,206$	-0,014	-0,032	-0,129	-0,414
Pb 300	0,954	$y = -0,097\ln(x) + 0,371$	-0,107	-0,189	-0,323	-0,436
Cr 300	0,908	$y = 0,0235\ln(x) + 0,01$	0,039	0,059	0,091	0,119
Zn 300	0,953	$y = -0,0152x + 0,02$	-0,025	-0,085	-0,405	-1,347
REF+SAT	0,933	$y = 0,0305\ln(x) + 0,023$	0,034	0,059	0,102	0,137
Pb+ SAT	0,965	$y = -0,114\ln(x) + 0,152$	0,027	-0,070	-0,228	-0,361
Cr+ SAT	0,664	$y = -0,055\ln(x) - 0,035$	-0,096	-0,143	-0,219	-0,283
Zn+ SAT	0,665	$y = -0,028\ln(x) - 0,03$	-0,061	-0,084	-0,123	-0,156

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

A água liberada dos grãos do agente de cura interna prolongou o período com 100 % de umidade relativa, pois a água do agente de cura substitui a água da pasta de cimento que foi evaporada pela superfície da amostra, auxiliando para a melhor hidratação do cimento, observado pelo aumento do grau de hidratação (item 5.3.1.2) em relação à amostra AN. Entretanto, os poros capilares não podem ser continuamente preenchidos pela água liberada e a umidade relativa interna, com a evolução da hidratação do cimento, é reduzida e a retração por secagem aumenta, conforme observado nas argamassas RCC e ALV com 90 dias, porém, a retração ainda ficou inferior à argamassa AN (Tabela 31), estando de acordo com o trabalho de Sakulich e Bentz (2012) no qual observaram

que a cura interna faz pouca diferença em idades precoces sobre o efeito de retração, aparecendo à melhora após 21 dias.

A retração por secagem nas argamassas ALV+SAT e RCC+SAT foram superiores nas idades iniciais até 28 dias, em relação à argamassa AN. Pois, a água dos agregados porosos foi liberada nos períodos iniciais (logo após o preparo da argamassa), auxiliando a hidratação e diminuindo a retração autógena e plástica das argamassas (essas retrações não foram estudadas neste trabalho) e, conseqüentemente, a água de cura interna não estava disponível para reduzir a retração por secagem. Essa teoria é comprovada pelo aumento da resistência e grau de hidratação dessas argamassas com 1 e 3 dias de hidratação, verificadas pelos ensaios de resistência mecânica, calor de hidratação e ressonância magnética nuclear (item 5.3.2.5.2). Assim como, a molhagem prévia do agregado promoveu um aumento da retração, devido ao maior teor de ar incorporado, relacionado à formação de micro bolhas durante a mistura.

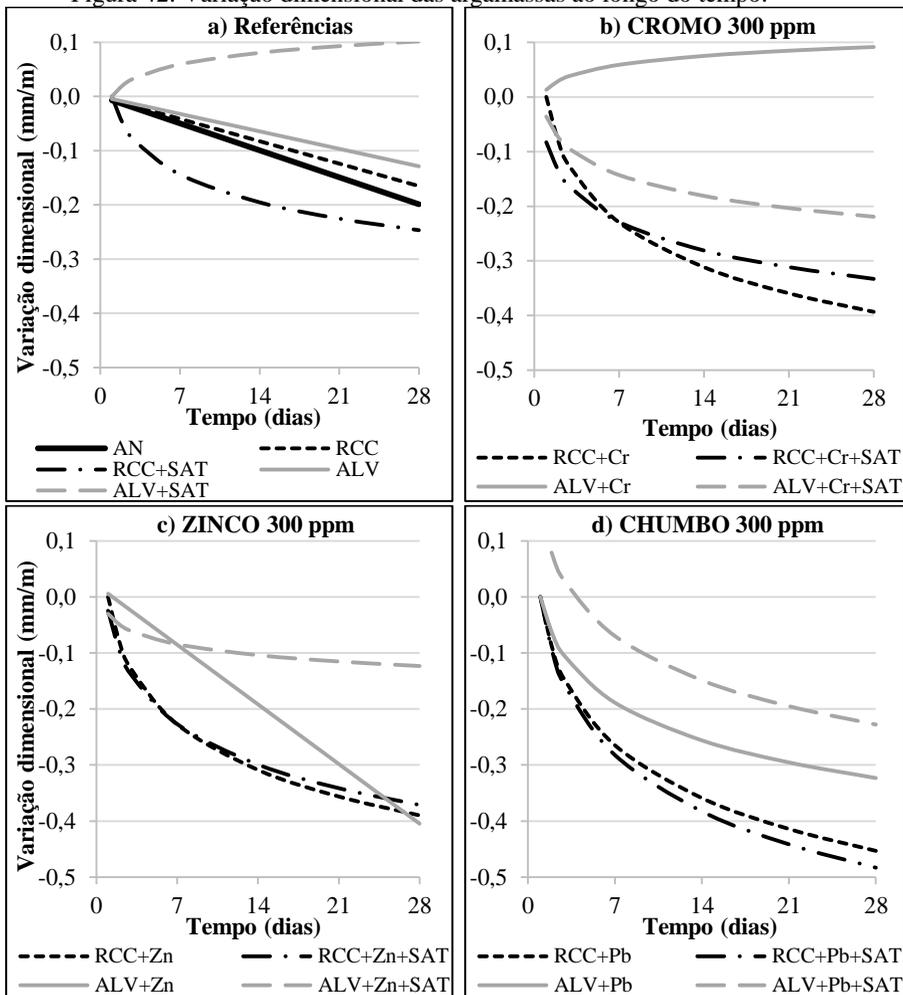
Na Figura 42 são apresentados os gráficos da variação dimensional das argamassas em função do tempo de hidratação do cimento. Na Figura 42-a estão as curvas das amostras de referência, na qual verificou-se que as argamassas ALV e RCC apresentaram redução da retração em relação à amostra AN. Bem como, as amostras RCC+SAT e ALV+SAT apresentam uma tendência a estabilizar aos 28 dias, enquanto que com 90 dias todas as amostras apresentaram retração inferior à amostra AN, conforme verificado na Tabela 31. Isso ocorreu, pois, a incorporação de agregados porosos (ALV e RCC) pode diminuir eficientemente a redução da umidade interna do material cimentício e, conseqüentemente, reduzir também a retração.

A incorporação dos metais pesados nas argamassas influenciou significativamente na variação dimensional (Figura 42-b, c, d), com aumento considerável da retração até os 28 dias, com exceção para a ALV+Zn+SAT. O aumento da retração está relacionado com a maior porosidade e com a absorção das argamassas, devido o agregado reciclado e o agregado leve apresentarem maior porosidade e absorção que o agregado natural, além da influência dos metais pesados, os quais alteraram a microestrutura das argamassas tornando-as mais absorventes e porosas que a argamassa AN.

A maior retração encontrada nas argamassas, quando incorporado os metais pesados, pode ser explicada, também, pois essas argamassas apresentaram maior consumo de cimento e maior trabalhabilidade (indicando a presença de mais água livre nessas misturas). O aumento na variabilidade dimensional é devido ao fato dos agregados reciclados serem compostos por partículas mais absorventes e porosas que a areia

natural, o que conduz a uma redução da rigidez, como também, está associado ao teor mais alto de cimento e pasta de cimento, não totalmente estabilizado, o que acarreta em uma maior retração (VEGAS *et al.*, 2009; NENO, BRITO e VEIGA, 2014).

Figura 42: Variação dimensional das argamassas ao longo do tempo.



5.3.2.3 Propriedades de Transporte

5.3.2.3.1 Absorção por imersão e porosidade aberta

Os valores de absorção de água e porosidade aberta das argamassas são apresentados na Tabela 32. A porosidade está diretamente relacionada com a absorção, quanto maior a porosidade maior será a capacidade da argamassa de absorver água.

Tabela 32: Absorção de água e porosidade aberta das argamassas.

	Material/ Argamassas	Absorção por imersão (%)	Porosidade aberta (%)
	REF-AN	7,1	15,9
	REF	8,7	17,3
AN + RCC	Pb 100 ppm	8,7	17,2
	Cr 100 ppm	8,5	16,9
	Zn 100 ppm	8,6	17,0
	Pb 300 ppm	8,6	17,0
	Cr 300 ppm	8,6	17,0
	Zn 300 ppm	8,4	16,7
	REF + SAT	8,1	16,7
	Pb 100 ppm + SAT	8,3	16,7
	Cr 100 ppm + SAT	8,4	16,9
	Zn 100 ppm + SAT	8,3	16,8
	Pb 300 ppm + SAT	8,4	17,0
	Cr 300 ppm + SAT	8,5	17,1
	Zn 300 ppm + SAT	8,2	16,4
	AN + ALV	REF	8,1
Pb 100 ppm		8,3	16,2
Cr 100 ppm		8,1	15,5
Zn 100 ppm		8,3	16,0
Pb 300 ppm		8,5	16,1
Cr 300 ppm		7,9	15,7
Zn 300 ppm		8,2	16,1
REF + SAT		7,9	15,7
Pb 100 ppm + SAT		8,2	15,6
Cr 100 ppm + SAT		8,0	14,9
Zn 100 ppm + SAT		8,3	16,2
Pb 300 ppm + SAT		7,8	15,7
Cr 300 ppm + SAT		7,9	15,6
Zn 300 ppm + SAT		8,2	16,1

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo tetravalente; Cr = cromo hexavalente; Zn = zinco bivalente.

A absorção por imersão das argamassas com agregado poroso foi em torno de 11,3 a 22,5 % superior à REF-AN, devido à maior porosidade dos agregados, corroborando com Corinaldesi (2009) e Zhutovsky e Kovler (2012). Porém, entre as argamassas com agregado reciclado e com agregado leve, obteve-se resultados semelhantes de absorção, não sendo influenciada pelo tipo de agregado poroso utilizado e pela capacidade de absorção desses agregados. Uma vez que, o agregado leve apresentou um potencial de absorção superior, mas as argamassas produzidas com esse agregado apresentaram praticamente a mesma absorção que as argamassas produzidas com o agregado reciclado. O oposto do que foi observado por Martínez *et al.* (2013) onde quanto maior a capacidade de absorção do agregado maior foi a absorção da argamassa. A absorção semelhante das argamassas com agregado reciclado e com agregado leve ocorreu, pois, nas argamassas com agregado leve, conforme observado nas micrografias de MEV, a pasta de cimento preencheu os poros do agregado reduzindo o potencial de absorção desse material.

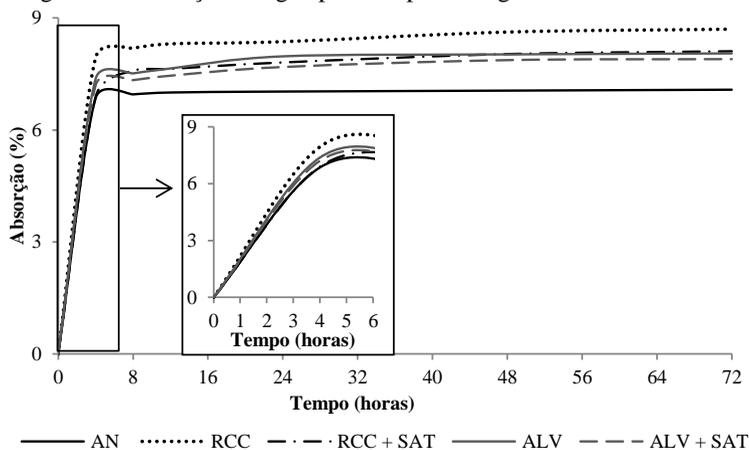
Os resultados de porosidade das argamassas não foram influenciados pelo teor e pelo metal presente nelas. Entretanto, o tipo de agregado e a realização da saturação prévia nas argamassas com agregado leve influenciaram. As argamassas com agregado leve reduziram a porosidade quando comparadas as argamassas com agregado reciclado. Bem como, as argamassas com agregado leve quando realizado a saturação prévia apresentaram uma porosidade aberta inferior às argamassas com agregado leve sem saturação prévia, em praticamente todos os casos, com exceção do zinco, além disso, essas argamassas apresentam porosidade inferior a REF-AN. Como já mencionado, esta melhora ocorreu pela pasta de cimento que preenche os poros do agregado leve e pela cura interna, a qual auxiliou para a criação de poros com diâmetros menores e/ou apresentaram um maior teor de poros fechados.

Fica claro que, os poros da argamassa e os poros interligados do agente de cura interna (agregado leve e agregado reciclado) determinaram a absorção de água do conjunto, corroborando com Zou *et al.* (2015). Conforme observado nas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV, item 5.3.2.5) as amostras com o agregado leve e reciclado auxiliaram para a densificação da pasta de cimento, também na zona de transição interfacial, impactando na menor absorção de água.

Na Figura 43 e na Figura 44 estão às curvas da cinética de absorção de água em função do tempo estabelecido em 4, 8, 12, 24, 48 e 72 horas. Observa-se que, no início, todas as argamassas tiveram um rápido ganho de massa, estando praticamente saturadas com 8 horas de imersão

em água, pois passado esse período as argamassas apresentaram a tendência a se estabilizar. Em todas as argamassas, após 4 horas de imersão em água apresentavam mais de 90 % da absorção total das amostras.

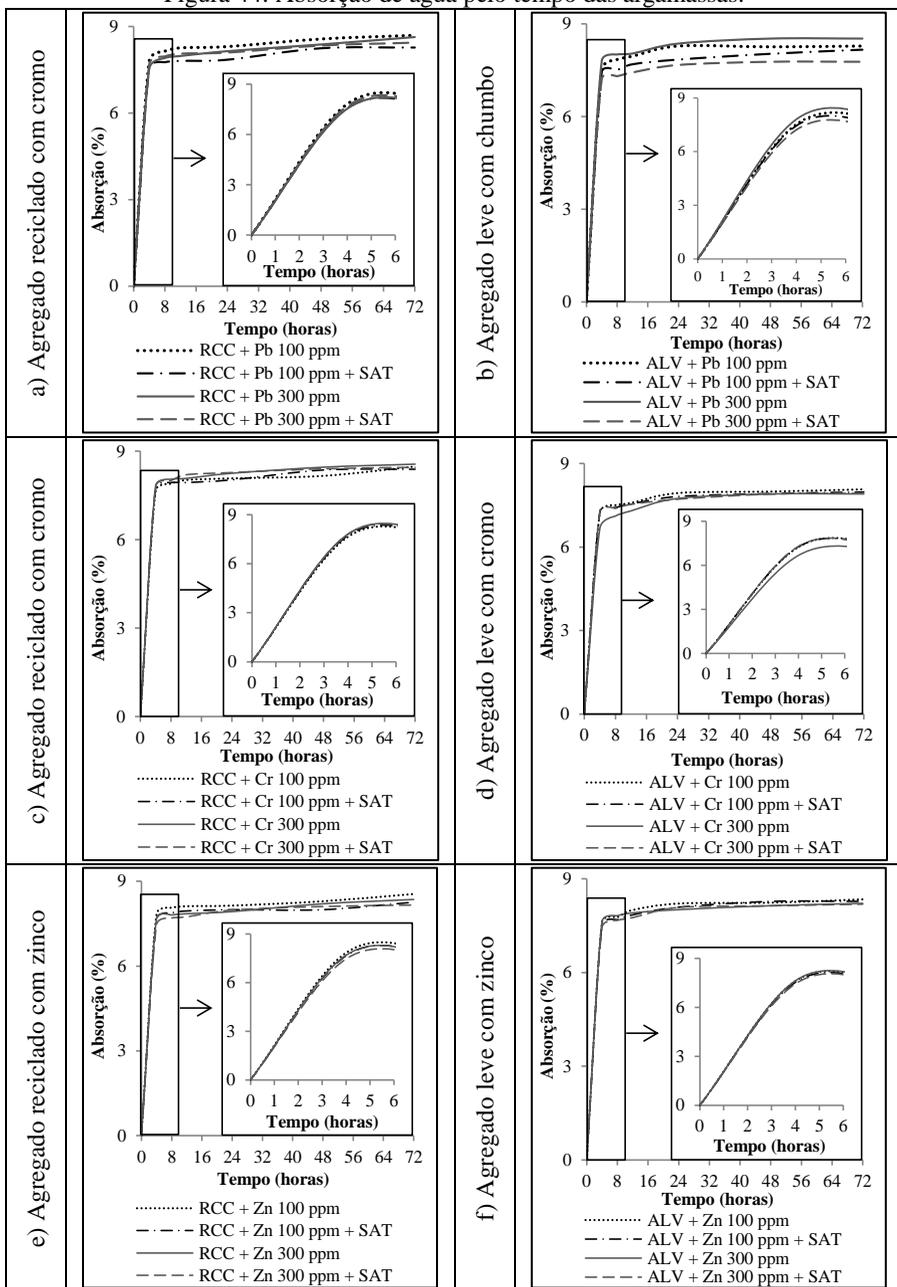
Figura 43: Absorção de água pelo tempo das argamassas de referência.



Na Figura 43 estão expostos os resultados de absorção das argamassas de referências. Fica claro que, a argamassa de referência com agregado reciclado sem molhagem prévia (REF-RCC) apresentou a maior absorção de água. As argamassas com agregado reciclado e com agregado leve (RCC+SAT, REF-ALV e ALV+SAT) apresentaram comportamento semelhante entre elas, com absorção em torno de 8 %. A incorporação de agregado leve nas argamassas como agente de cura interna aumenta o grau de hidratação, produzindo uma microestrutura mais densa, sendo essa responsável pela redução da absorção de água e da sorptividade (HENKENSIEFKEN *et al.*, 2009). Como visto anteriormente, o agregado leve apresentou uma maior porosidade interna, auxiliando na liberação da água do seu interior para a pasta de cimento. Enquanto que, o agregado reciclado, quando utilizado saturado previamente, foi mais eficiente como agente de cura interna até os 28 dias em comparação à sua utilização seco previamente.

Na Figura 44-a, -c, -e são apresentados os resultados de absorção das argamassas com agregado reciclado com os três metais (Pb, Cr e Zn). Evidenciou-se que os metais não alteraram a absorção de água das argamassas, assim como a saturação prévia do agregado, uma vez que a absorção ficou praticamente constante em todos os casos.

Figura 44: Absorção de água pelo tempo das argamassas.



Já, na Figura 44-b, -d, -f estão os gráficos de absorção das argamassas com agregado leve e incorporação dos metais pesados. A incorporação dos metais também não alteraram significativamente a absorção das argamassas, bem como a saturação prévia do agregado. Nota-se que, as argamassas com chumbo apresentaram a maior variabilidade da absorção com uma pequena redução pela realização da saturação prévia do agregado (Figura 44-b).

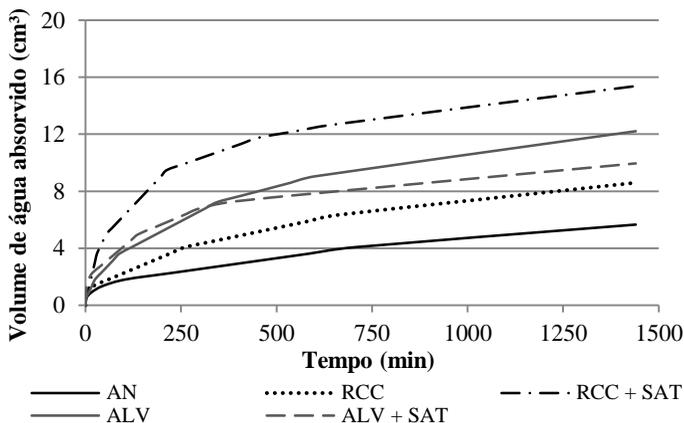
De acordo com a análise de variância realizada nas amostras, a absorção por imersão das argamassas não foi influenciada pelo tipo e teor de metal, pelo agregado utilizado e nem pela realização da saturação prévia do agregado. Já, a porosidade aberta foi influenciada pelo teor do metal e pelo agregado utilizado, com 95 % de confiabilidade (APÊNDICE 1).

5.3.2.3.2 Absorção por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado nas amostras com 28 dias de cura, passado esse período as amostras ficaram 24 horas na estufa a 50 ± 2 °C e em seguida foram ensaiadas.

Nas Figura 45 a Figura 47 estão apresentadas as curvas do volume de água absorvido em função do tempo para todas as composições. Percebe-se na Figura 45 que a argamassa de referência que apresentou o maior potencial de absorção foi a RCC+SAT, e a argamassa com menor absorção, entre as argamassas com agregado poroso, foi a REF-RCC. O oposto do que aconteceu no ensaio de absorção por imersão, no qual a argamassa REF-RCC apresentou o maior potencial de absorção, sugerindo que a argamassa com agregado reciclado apresentou poros maiores que as argamassas com agregado leve (REF-ALV e ALV+SAT) e RCC+SAT. Porém, os poros não estão interconectados, o que reduziu a absorção por capilaridade, sendo comprovado pela curva da absorção capilar, uma vez que a argamassa REF-RCC e REF-AN apresentaram uma lenta absorção inicial, em comparação com as demais amostras, e quanto mais interligados os poros capilares, mais rápida será a absorção, ou seja, a argamassa RCC+SAT, apresentou poros menores que a REF-RCC, entretanto mais interligados e sua porosidade total foi superior, justificando o aumento do volume absorvido por absorção capilar.

Figura 45: Volume de água absorvido pelas amostras de referências por capilaridade em função do tempo.

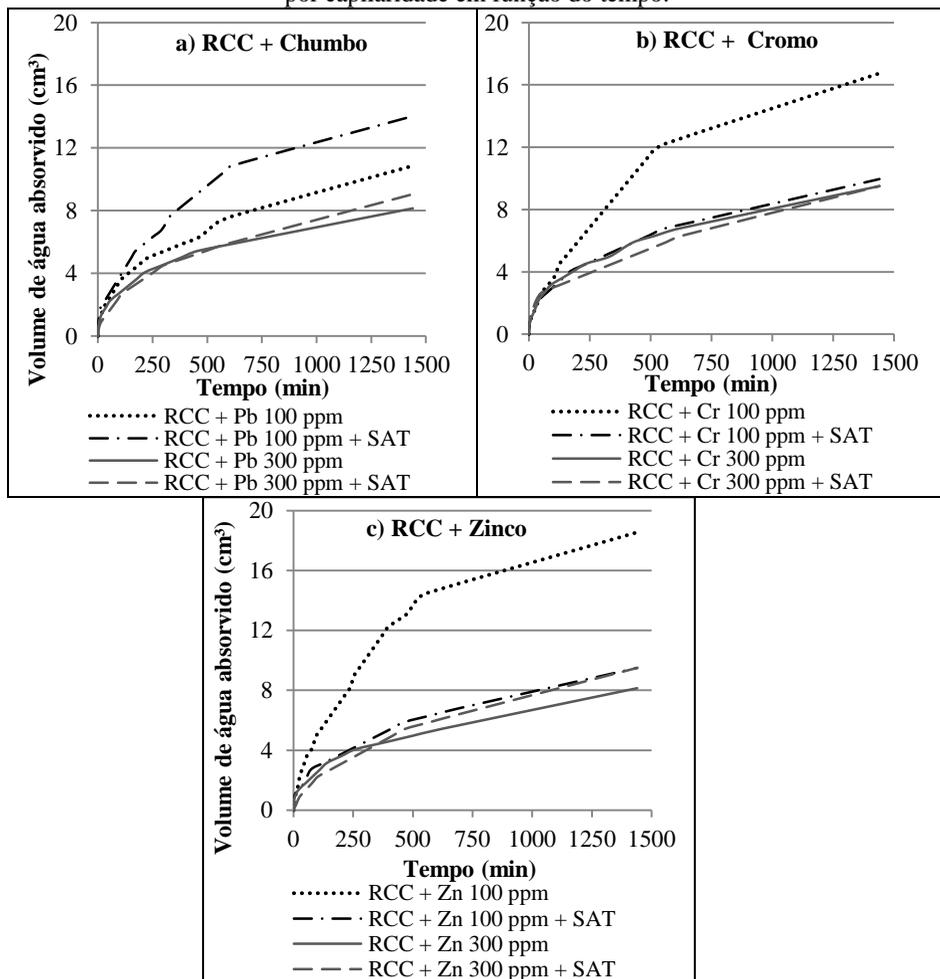


As argamassas com substituição parcial (25%) do agregado natural por agregado reciclado apresentaram um potencial de absorção por capilaridade superior à amostra REF-AN, estando em desacordo com a literatura, uma vez que, Neno, Brito e Veiga (2014) e Ledesma *et al.* (2014) encontraram absorção semelhante, entre argamassas com agregado reciclado (25 %) e a referência AN, essa melhora causada na absorção capilar foi atribuída à presença de partículas ultrafinas no agregado reciclado, as quais preenchem os espaços vazios entre as partículas maiores, deixando poros muito pequenos e com menor capacidade de absorção de água. Deste modo, a divergência do resultado obtido em relação à literatura foi devido à falta da presença de finos, pois foram utilizadas apenas as frações 0,15 a 2,4 mm, e o agregado reciclado ainda foi lavado antes da utilização (Figura 45). Bem como, esse aumento da absorção capilar causada pela utilização do agregado reciclado está ligado à presença da argamassa porosa aderida ao agregado reciclado.

Pela Figura 46 constatou-se que as argamassas com incorporação de 300 ppm de chumbo (RCC+ Pb 300 ppm e RCC+ Pb 300ppm+ SAT) apresentaram a mesma porosidade (verificado no ensaio de porosidade aberta, item 5.3.2.3.1) e o mesmo potencial de absorção capilar. Bem como, em relação às suas respectivas referências, a incorporação de 300 ppm de chumbo e zinco não alteraram a capacidade de absorção capilar, enquanto que, a argamassa com 300 ppm+ SAT, de chumbo e zinco, reduziram a absorção. Já, em relação às argamassas com incorporação de 100 ppm de chumbo, aumentou a absorção em relação à REF-RCC e,

quando realizada a saturação prévia (RCC+ Pb 100 ppm+ SAT) a absorção foi praticamente igual da RCC+SAT. Verificou-se que, quando não realizado a saturação prévia nas argamassas com 100 ppm de cromo e zinco, houve a tendência a aumentar a absorção capilar consideravelmente (116 % para a argamassa com zinco e 94,2 % para a argamassa com cromo, em relação à REF-RCC), ao mesmo tempo em que a incorporação de 300 ppm de cromo e zinco não alterou a absorção das argamassas (com ou sem molhagem prévia dos agregados).

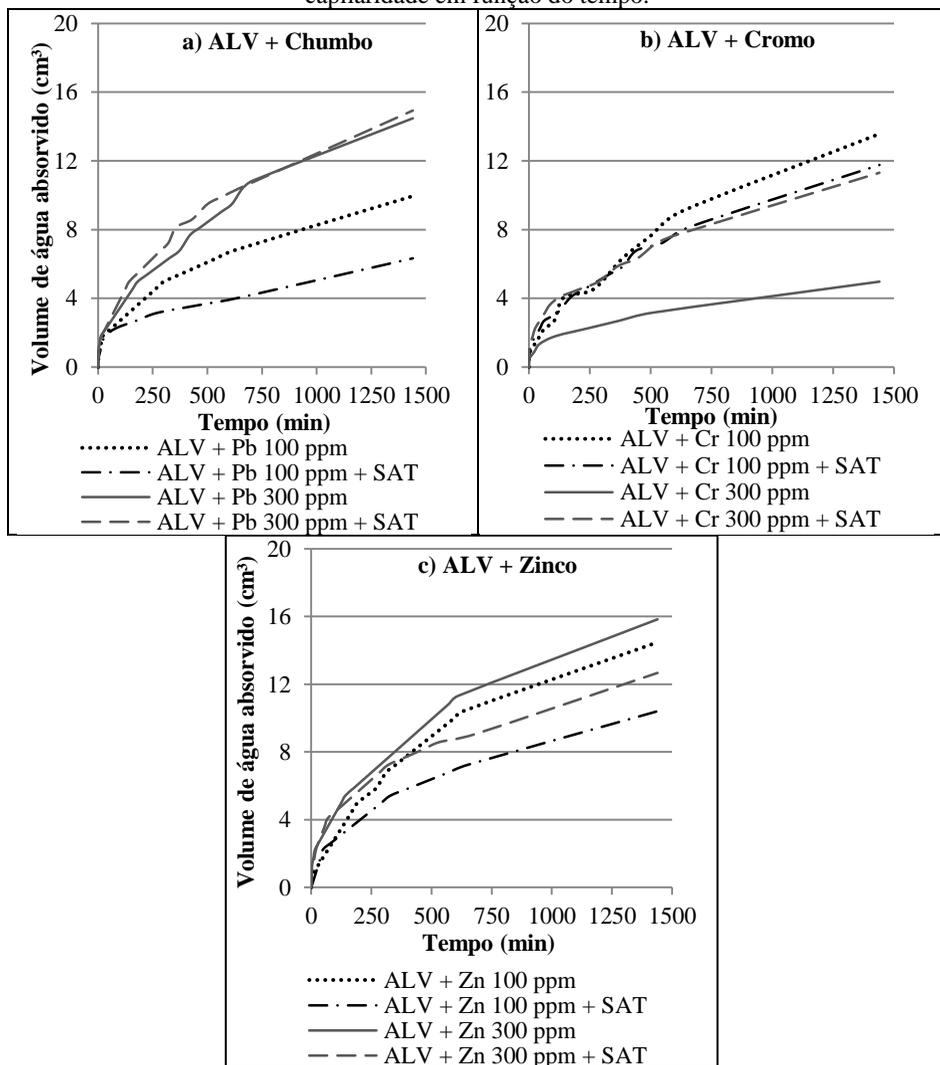
Figura 46: Volume de água absorvido pelas amostras com agregado reciclado por capilaridade em função do tempo.



As argamassas com agregado leve apresentaram potencial de absorção por capilaridade superior à maioria das argamassas com agregado reciclado. Sendo que, na absorção por imersão, todas as argamassas apresentaram praticamente a mesma absorção, não sendo influenciada pelo material utilizado. Entretanto, a porosidade aberta apresentada pelas argamassas com agregado leve foram inferiores às argamassas com agregado reciclado, contradizendo os resultados de absorção por capilaridade. Isso ocorreu, pois houve outros parâmetros que também influenciaram na absorção por capilaridade das argamassas, como: tortuosidade, porosidade total, conectividade dos poros e o diâmetro médio dos poros. De acordo com a Tabela 33, o raio crítico dos poros das argamassas com agregado leve foi superior ao raio crítico dos poros das argamassas com agregado reciclado e incorporação de metais pesados (Figura 46 e Figura 47). Assim, conclui-se que as argamassas com agregado leve apresentaram uma maior conectividade dos poros.

Na Figura 47 constatou-se que a incorporação de 300 ppm de chumbo nas argamassas com agregado leve resultou no aumento da absorção capilar em relação às argamassas com 100 ppm de chumbo. Nas argamassas com 100 ppm de chumbo, a realização da molhagem prévia reduziu o potencial de absorção. As argamassas com agregado leve e incorporação de cromo apresentaram um comportamento distinto das argamassas com agregado leve com incorporação de chumbo e zinco, uma vez que essas argamassas com cromo apresentaram maior absorção capilar com o menor teor de metal e o aumento do teor de metal auxiliou para reduzir a absorção capilar, pelo efeito de tamponamento dos poros. A incorporação do maior teor de zinco aumentou a absorção capilar da amostra com agregado leve e, nos dois teores de metal incorporado, a molhagem prévia auxiliou para redução da porosidade e da absorção capilar. Esse comportamento distinto entre as argamassas com agregado leve foi devido a influencia dos metais na microestrutura das argamassas.

Figura 47: Volume de água absorvido pelas amostras com agregado leve por capilaridade em função do tempo.



Os valores de sorptividades foram determinados a partir da inclinação da reta formada pelo volume do líquido absorvido pela área da seção, em função da raiz do tempo. A sorptividade das argamassas está diretamente relacionada às taxas de absorção, quanto maior a sorptividade maior será a velocidade de absorção dessas argamassas. Ou seja,

quanto maior a sorptividade da argamassa, menor o raio dos poros e, conseqüentemente, maior a conectividade e menor a tortuosidade. Na Tabela 33 estão apresentadas as equações das retas, bem como os resultados de sorptividade das argamassas a água. Os valores de sorptividade das argamassas não foram alterados significativamente pela incorporação dos metais e pelos agregados utilizados, corroborando com os resultados observados na absorção capilar das amostras.

Tabela 33: Equações das retas para obtenção da sorptividade à água das amostras e o ângulo de molhamento aparente.

	Material/ Argamassas	Equação da reta	R ²	Sorptividade (cm x min ^{1/2}) x10 ⁻²	θ (°)	R _{crit} (µm)
	REF-AN	0,0068x +0,0178	0,9938	0,68	88	1,21
AN + RCC	REF	0,0118x +0,0113	0,9871	1,18	84	3,93
	Pb 100 ppm	0,015x +0,016	0,9941	1,50	77	7,77
	Cr 100 ppm	0,0251x -0,0418	0,9857	2,51	76	8,35
	Zn 100 ppm	0,0332x -0,0639	0,9900	3,32	84	3,64
	Pb 300 ppm	0,0199x +0,0213	0,9936	1,99	83	4,58
	Cr 300 ppm	0,0134x +0,0193	0,9938	1,34	86	2,42
	Zn 300 ppm	0,0107x +0,0215	0,9896	1,07	87	1,66
	REF + SAT	0,0345x -0,0228	0,9932	3,45	81	5,62
	Pb 100 ppm + SAT	0,0218x -0,0071	0,9928	2,18	80	6,12
	Cr 100 ppm + SAT	0,0138x +0,0156	0,9977	1,38	86	2,26
	Zn 100 ppm + SAT	0,0127x +0,0164	0,9961	1,27	83	4,22
	Pb 300 ppm + SAT	0,0127x -0,0019	0,9956	1,27	86	2,34
	Cr 300 ppm + SAT	0,0111x +0,0326	0,9850	1,11	84	3,72
	Zn 300 ppm + SAT	0,0136x -0,0275	0,9974	1,36	88	1,35
AN + ALV	REF	0,0194x -0,0053	0,9980	1,94	83	4,32
	Pb 100 ppm	0,0132x +0,0153	0,9949	1,32	78	7,13
	Cr 100 ppm	0,0177x -0,0168	0,9760	1,77	83	4,35
	Zn 100 ppm	0,0225x -0,0552	0,9868	2,25	76	8,38
	Pb 300 ppm	0,0194x -0,0029	0,9847	1,94	81	5,50
	Cr 300 ppm	0,0108x -0,051	0,9804	1,08	84	3,95
	Zn 300 ppm	0,022x +0,0097	0,9960	2,20	75	9,04
	REF + SAT	0,0183x +0,0276	0,9923	1,83	83	4,47
	Pb 100 ppm + SAT	0,0071x +0,0362	0,9601	0,71	84	3,54
	Cr 100 ppm + SAT	0,0152x +0,0104	0,9939	1,52	81	5,86
	Zn 100 ppm + SAT	0,0152x -0,0107	0,9942	1,52	78	7,30
	Pb 300 ppm + SAT	0,0389x -0,2457	0,9844	3,89	86	2,55
	Cr 300 ppm + SAT	0,0139x +0,0402	0,9908	1,39	83	4,22
	Zn 300 ppm + SAT	0,0178x +0,0352	0,9866	1,78	81	5,85

Nota: θ = ângulo de molhamento; R_{crit} = raio crítico do poro; REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

Com os valores de sorptividade a água e álcool foram determinados o ângulo de molhamento das argamassas, os quais estão disponibilizados, também, na Tabela 33. Todos os ângulos de molhamento ficaram com os valores abaixo de 90° , quanto menor o ângulo de molhamento mais molhante é o material, e 65 % das amostras ficaram com o ângulo de molhamento superior a 80° , ou seja, a molhabilidade dessas argamassas é baixa. A molhagem prévia auxiliou para a redução do ângulo de molhamento em todas as argamassas com agregado reciclado, estando de acordo com o ensaio de absorção capilar, isso pode ser explicado pelo menor raio crítico dos poros nessas argamassas devido à melhor ligação entre a matriz cimentícia e o agregado (NENO, BRITO e VEIGA, 2014).

Com auxílio da equação de Kevin-Laplace foi calculado o raio crítico dos poros das argamassas (Tabela 33). Em todos os casos, os poros foram classificados como poros capilares. O menor raio do poro foi obtido na argamassa AN. A molhagem prévia nas argamassas com agregado reciclado reduziu o raio do poro nas argamassas com incorporação do metal (zinco, cromo ou chumbo) nas duas proporções. O oposto foi verificado nas argamassas com agregado leve, aonde a molhagem prévia resultou no aumento do raio dos poros em praticamente todas as amostras (exceção para as amostras com cromo, nas duas proporções).

5.3.2.3.3 Permeabilidade ao vapor

Na Tabela 34 são apresentados os resultados da permeabilidade ao vapor das argamassas em diferentes idades de hidratação. O ensaio de permeabilidade foi realizado apenas nas referências e nas amostras com 300 ppm de metal (Pb, Cr e Zn).

Em todas as idades e entre todas as argamassas estudadas, a amostra com menor permeabilidade ao vapor foi à argamassa REF-AN. Essa foi à argamassa que apresentou o menor diâmetro e a menor conectividade dos poros, comprovado pelos resultados de absorção por imersão e sorptividade, com um raio crítico de poro de $1,21 \mu\text{m}$ (Tabela 34).

De modo geral, com o aumento do tempo de hidratação, reduziu consideravelmente a permeabilidade das amostras pela densificação da matriz. A saturação prévia das argamassas com agregado reciclado auxiliou para o aumento da permeabilidade em relação às amostras produzidas com o agregado reciclado seco. O oposto foi observado nas amostras com agregado leve. Entre todas as amostras, as maiores permeabilidades foram obtidas nas argamassas com agregado leve e com os agregados secos previamente.

Tabela 34: Permeabilidade ao vapor das amostras ao longo do tempo.

Material/ Argamassas	Permeabilidade ao vapor (kg/m.s.MPa)				
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
REF-AN	1,60E-19	1,43E-20	1,22E-21	1,15E-22	2,38E-24
REF	1,85E-19	1,72E-20	1,51E-21	1,44E-22	3,40E-24
Pb 300 ppm	2,35E-19	1,62E-20	1,31E-21	1,18E-22	3,50E-24
Cr 300 ppm	1,73E-19	1,60E-20	1,40E-21	1,34E-22	3,92E-24
Zn 300 ppm	2,87E-19	2,52E-20	1,74E-21	1,62E-22	4,65E-24
REF + SAT	2,37E-19	2,04E-20	1,84E-21	1,67E-22	3,79E-24
Pb 300 ppm + SAT	2,52E-19	2,20E-20	1,94E-21	1,54E-22	4,79E-24
Cr 300 ppm + SAT	2,44E-19	2,18E-20	1,87E-21	1,64E-22	2,95E-24
Zn 300 ppm + SAT	2,38E-19	1,95E-20	1,76E-21	1,63E-22	4,12E-24
REF	2,26E-19	1,86E-20	1,59E-21	1,37E-22	3,05E-24
Pb 300 ppm	3,83E-19	2,48E-20	1,83E-21	1,78E-22	3,63E-24
Cr 300 ppm	1,86E-19	1,72E-20	1,39E-21	1,46E-22	3,45E-24
Zn 300 ppm	3,64E-19	1,85E-20	1,58E-21	1,51E-22	3,69E-24
REF + SAT	2,01E-19	1,99E-20	1,52E-21	1,48E-22	6,09E-24
Pb 300 ppm + SAT	3,40E-19	1,78E-20	1,72E-21	1,50E-22	2,54E-24
Cr 300 ppm + SAT	2,02E-19	1,86E-20	1,78E-21	1,47E-22	3,84E-24
Zn 300 ppm + SAT	2,08E-19	1,85E-20	1,54E-21	1,31E-22	5,43E-24

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

Com um dia de hidratação, as amostras com maiores permeabilidades foram às amostras com incorporação de 25 % de agregado leve e com metal pesado (ALV+Pb, ALV+Pb+SAT e ALV+Zn).

O aumento da permeabilidade das argamassas com agregado reciclado e com agregado leve, em relação à amostra REF-AN, foi devido ao fato de que esses agregados apresentam maior porosidade, bem como no agregado reciclado tem-se a presença de argamassa aderida, que auxilia para o aumento da permeabilidade.

Comparando os resultados de permeabilidade ao vapor com os resultados de massa específica e resistência mecânica (aos 28 dias), percebeu-se que, em relação aos resultados das argamassas com o agregado saturado ou seco, ao reduzir a massa específica e a resistência mecânica da argamassa reduziu também à permeabilidade. Esperava-se o oposto, pois, ao aumentar a massa específica mais densa é a argamassa e consequentemente menos permeável. Bem como, quando reduziu a permeabilidade, aumentou a retração das argamassas com agregado reciclado, o oposto foi observado nas argamassas com agregado leve, ou seja, ao reduzir a permeabilidade reduziu a retração. Esse comportamento é explicado pela realização da cura interna nessas argamassas, uma vez que, com o aumento da permeabilidade das argamassas, a água disponibilizada pela cura interna consegue alcançar uma maior extensão da pasta de

cimento, conforme será observado no item a seguir sobre distância percorrida pela água. Acarretando numa melhor hidratação dessas argamassas e consequente melhora da zona de transição interfacial, impactando no aumento da massa específica e da resistência mecânica. Uma vez que, a permeabilidade foi maior, entretanto a porosidade e a absorção não foram afetadas.

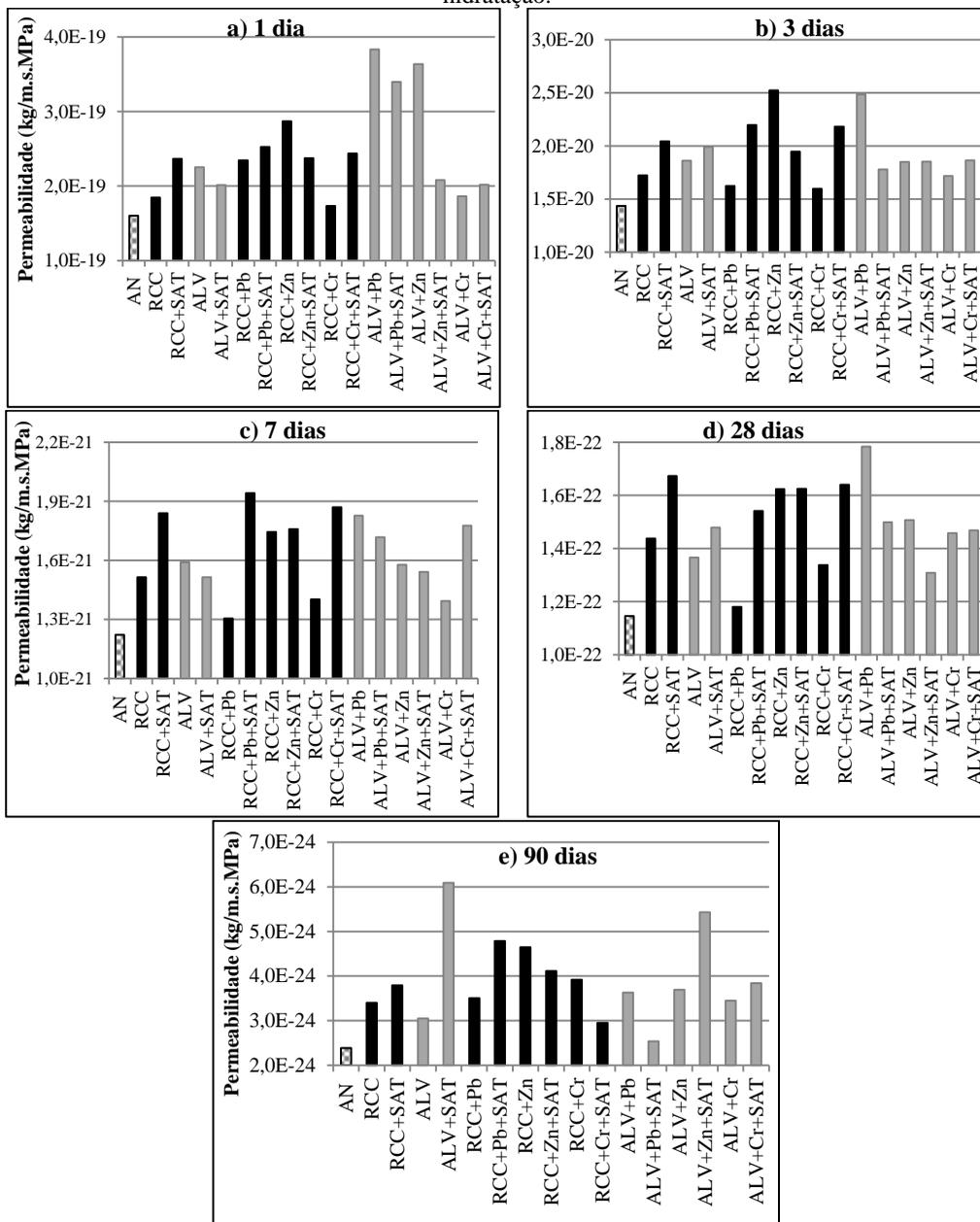
O aumento da permeabilidade obtido para as argamassas com agregado poroso pode ser considerado uma característica apreciável, dependendo da destinação final dada à argamassa. Pois, além de auxiliar para a cura interna, a maior permeabilidade em argamassas de revestimento contribui para a capacidade de liberação de vapor de água das argamassas, contribuindo para a secagem tanto da argamassa como do seu substrato. Essa maior permeabilidade das argamassas com agregado leve e reciclado em relação à REF-AN está ligada às partículas mais porosas dos agregados, com maior absorção de água, o que permite a livre circulação da permeabilidade ao vapor de água (NENO, BRITO e VEIGA, 2014).

Na Figura 48 estão expostos os gráficos de permeabilidade ao vapor. Com 1 dia de hidratação as maiores permeabilidade são das argamassas com agregado leve.

Com 3 dias de hidratação, as argamassas com agregado leve com incorporação de metal pesado apresentaram resultados de permeabilidade inferiores à REF-ALV e ALV+SAT (exceto a amostra ALV+Pb 300 ppm), ocasionado pelo efeito de tamponamento dos poros. Verificou-se que, com 7 e 28 dias, a permeabilidade das amostras com agregado leve e com agregado reciclado ficaram semelhantes, com um pequeno aumento da permeabilidade para as argamassas com agregado reciclado.

Aos 90 dias de hidratação, as maiores permeabilidades são das argamassas realizada a saturação prévia do agregado, sendo as mais expressivas as amostras ALV+SAT e ALV+ Zn 300 ppm+ SAT. A amostra ALV+ Zn+ SAT apresentou a menor retração das argamassas com 90 dias, corroborando com o resultado de permeabilidade. Pois, devido à maior permeabilidade, a redução do diâmetro dos poros e o maior grau de hidratação, os poros capilares foram mantidos com água por maior período de tempo, reduzindo a retração por secagem.

Figura 48: Permeabilidade ao vapor das argamassas em diferentes idades de hidratação.



De modo geral, verificou-se que as argamassas com chumbo e cromo (RCC+ Pb 300 ppm e RCC+ Cr 300 ppm) apresentaram, em todos os tempos de hidratação, as menores permeabilidades dentre as argamassas com agregado reciclado. Devido às alterações causadas na microestrutura pela incorporação dos metais pesados, como redução da sorptividade dessas argamassas, pelo refinamento dos poros e menor conectividade entre eles.

Verificou-se que as amostras apresentam a tendência de conforme reduziu a permeabilidade, maior foi a resistência mecânica, ou seja, com o aumento da hidratação (de 1 para 90 dias) reduziu a permeabilidade ao vapor ao mesmo tempo que aumentou a resistência mecânica, pela redução da porosidade.

5.3.2.3.4 Distância percorrida pela água

Nesse ensaio foram estudadas apenas as amostras de referência e com incorporação de 300 ppm de metal. Em tese, quando a umidade relativa interna da pasta ao redor do agente de cura interna é inferior a umidade dentro do agente de cura, a água contida no agregado poroso começa a fluir, a fim de preencher os poros vazios e aumentar a umidade relativa interna. Com esse ensaio, foi determinado qual é a distância que água consegue fluir, quando solicitada. Para a realização dos cálculos foram considerados os valores da porosidade capilar da argamassa de 0,120; 0,060; 0,015; 0,010 e 0,005, respectivamente, para as idades de 1, 3, 7, 28 e 90 dias. Bem como, o valor da permeabilidade foi estimado de acordo com o ensaio de permeabilidade ao vapor. Na Tabela 35 têm-se a distância percorrida pela água a partir de um agente de cura interna, ou seja, do agregado poroso.

Com o aumento do período de hidratação, ocorreu uma redução brusca da distância que a água consegue percorrer para manter a umidade relativa alta e continuar a hidratação do cimento. Com pouco mais de um dia de hidratação, a água percorreu distâncias de até 10,4 mm. Com 3 dias a distância ficou em torno de 3,5 mm e com 7 dias a distância reduziu para menos de 1 mm. Já, com 28 dias a água percorreu menos que 0,25 mm. Com 90 dias de hidratação, praticamente não houve movimentação da água, pois a distância foi em torno de 0,05 mm.

A saturação prévia do agregado reciclado auxiliou para o aumento da distância percorrida pela água nas primeiras idades (1, 3 e 7 dias) em relação às amostras com agregado reciclado utilizado seco previamente. Com 28 e 90 dias, as distâncias que água consegue migrar são praticamente as mesmas para as duas condições de utilização do agrega-

do reciclado (Tabela 35). Corroborando com os resultados de calor de hidratação das argamassas e na resistência mecânica.

Tabela 35: Distância percorrida pela água a partir do agente de cura interna.

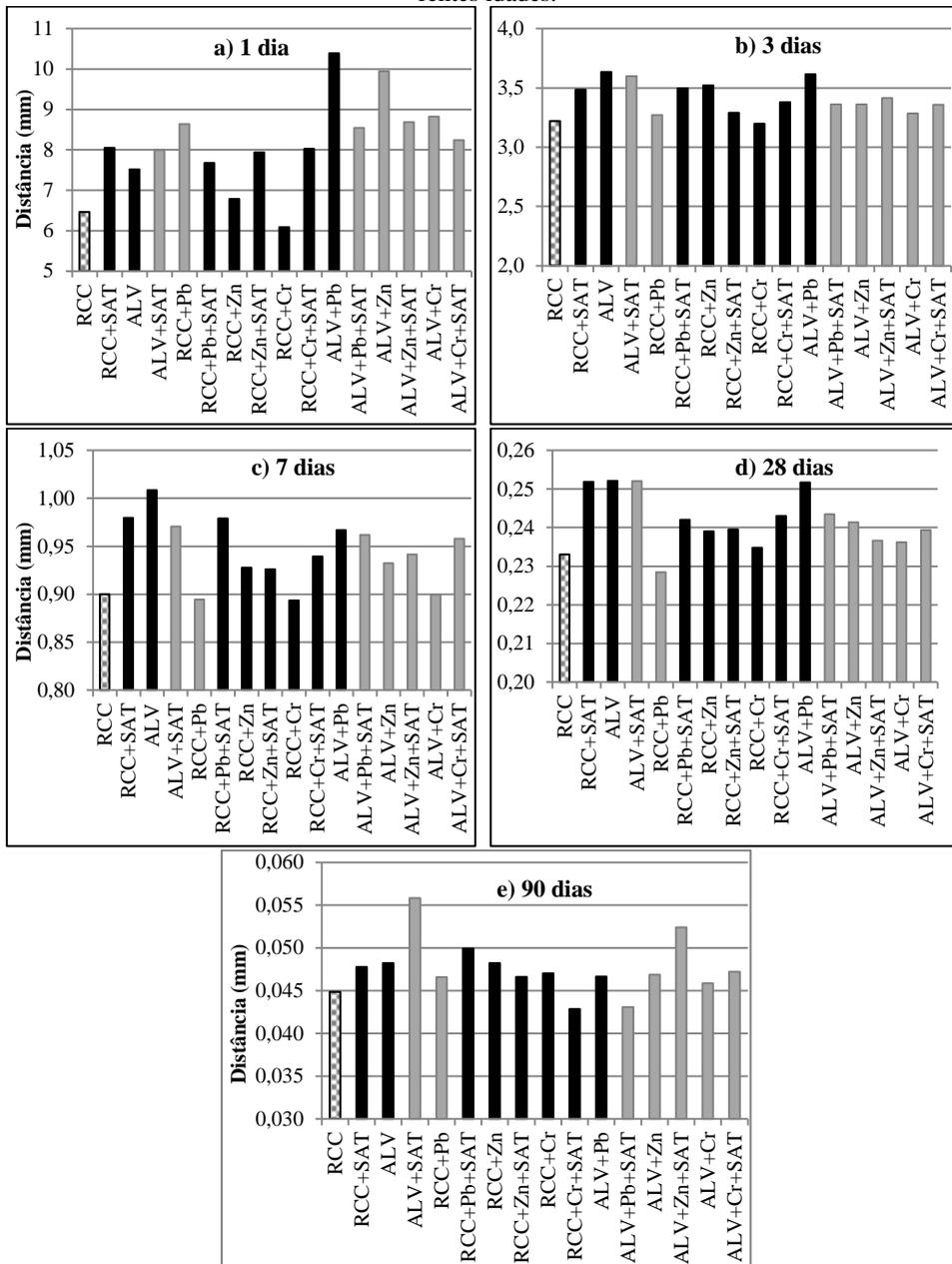
	Material/ Argamassas	Distância percorrida pela água (mm)				
		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
AN + RCC	REF	6,46	3,22	0,90	0,23	0,045
	Pb 300 ppm	8,64	3,27	0,89	0,23	0,047
	Cr 300 ppm	6,09	3,20	0,89	0,23	0,047
	Zn 300 ppm	6,79	3,52	0,93	0,24	0,048
	REF + SAT	8,05	3,48	0,98	0,25	0,048
	Pb 300 ppm + SAT	7,68	3,50	0,98	0,24	0,050
	Cr 300 ppm + SAT	8,02	3,38	0,94	0,24	0,043
	Zn 300 ppm + SAT	7,94	3,29	0,93	0,24	0,047
AN + ALV	REF	7,52	3,63	1,01	0,25	0,048
	Pb 300 ppm	10,39	3,62	0,97	0,25	0,047
	Cr 300 ppm	8,82	3,28	0,90	0,24	0,046
	Zn 300 ppm	9,95	3,36	0,93	0,24	0,047
	REF + SAT	7,99	3,60	0,97	0,25	0,056
	Pb 300 ppm + SAT	8,55	3,36	0,96	0,24	0,043
	Cr 300 ppm + SAT	8,24	3,36	0,96	0,24	0,047
	Zn 300 ppm + SAT	8,69	3,41	0,94	0,24	0,052

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

Nas argamassas com agregado leve, as amostras com maior permeabilidade a água (com 1 dia) foram das amostras fabricadas com o agregado leve seco previamente. Com 3 dias, os valores variam com o tipo do metal utilizado e com a realização da saturação prévia. Já, com 7, 28 e 90 dias de hidratação, as distâncias percorridas pela água foram semelhantes em todas as argamassas com agregado leve, não variando com a saturação prévia (Tabela 35).

Na Figura 49 são apresentados os resultados da distância percorrida pela água em função do tempo de hidratação da argamassa. De modo geral, entre todas as amostras com agregados porosos, as amostras com agregado leve apresentaram maior permeabilidade da água na pasta de cimento, em todos os tempos de hidratação analisados. Porém, as distâncias percorridas nas argamassas com agregado reciclado são compatíveis com as distâncias apresentadas pelo agregado leve e, de acordo com Rilem TC-196 (2007), o movimento da água dentro do material cimentício pode ser usado como um indicador do processo de cura interna e de seu desenvolvimento no tempo. Pois, quando a pasta de cimento se auto desseca, devido à hidratação, é gerado um gradiente de umidade e a água dentro dos agregados migra para a pasta de cimento.

Figura 49: Distância percorrida pela água a partir do agregado poroso em diferentes idades.



Na Tabela 36 têm-se os valores dos fluxos volumétricos da água com 1, 3, 7, 28 e 90 dias de hidratação, o qual é referente ao fluxo da água através de um poro cilíndrico na pasta de cimento durante o processo de hidratação. O fluxo da água deve equilibrar a demanda de água da argamassa devido à retração química em curso.

Tabela 36: Fluxo volumétrico da água nas diferentes idades de hidratação.

	Material/ Argamassas	Fluxo volumétrico da água (m ³ /s)				
		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
AN + RCC	REF	4,97E-21	8,99E-22	2,65E-22	9,48E-23	5,69E-24
	Pb 300 ppm	5,33E-21	8,09E-22	2,14E-22	7,20E-23	5,73E-24
	Cr 300 ppm	4,80E-21	8,08E-22	2,38E-22	8,45E-23	6,71E-24
	Zn 300 ppm	9,15E-21	14,50E-22	3,18E-22	11,10E-23	8,44E-24
	REF + SAT	5,79E-21	10,70E-22	3,26E-22	11,00E-23	6,28E-24
	Pb 300 ppm + SAT	6,68E-21	11,90E-22	3,54E-22	10,10E-23	8,53E-24
	Cr 300 ppm + SAT	6,07E-21	12,20E-22	3,49E-22	11,10E-23	4,81E-24
	Zn 300 ppm + SAT	5,89E-21	10,60E-22	3,23E-22	11,10E-23	7,29E-24
AN + ALV	REF	5,80E-21	9,00E-22	2,56E-22	8,16E-23	4,51E-24
	Pb 300 ppm	9,30E-21	13,90E-22	3,29E-22	12,20E-23	6,05E-24
	Cr 300 ppm	3,72E-21	8,83E-22	2,36E-22	9,61E-23	5,70E-24
	Zn 300 ppm	8,98E-21	9,64E-22	2,74E-22	9,87E-23	6,18E-24
	REF + SAT	4,61E-21	10,00E-22	2,48E-22	9,20E-23	11,00E-24
	Pb 300 ppm + SAT	9,43E-21	9,09E-22	3,02E-22	9,72E-23	3,82E-24
	Cr 300 ppm + SAT	4,49E-21	9,76E-22	3,19E-22	9,57E-23	6,51E-24
	Zn 300 ppm + SAT	4,45E-21	9,51E-22	2,62E-22	8,15E-23	9,85E-24

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

Nas argamassas com agregado reciclado sem incorporação de metal (RCC e RCC+SAT), em todas as idades, a saturação prévia auxiliou para o aumento do fluxo da água, também verificado nas argamassas com agregado reciclado e metal pesado nas idades de 7 e 28 dias e nas outras idades em alguns casos. O mesmo ocorreu nas argamassas de referência com agregado leve (ALV e ALV+SAT), ou seja, a saturação prévia do agregado aumentou o fluxo de água em todos os casos. Nas argamassas com adição de metal pesado, a saturação e o metal influenciaram no resultado, sendo variada a melhora. Isso pode ter ocorrido, pois, como esse agregado apresenta maior porosidade, a diferença da cura interna entre o agregado utilizado saturado previamente e o agregado utilizado seco não é expressiva, conforme observado nos ensaios de permeabilidade, distância percorrida pela água e resistência mecânica.

De modo geral, a saturação prévia do agregado reciclado auxiliou para o aumento do fluxo volumétrico da água. Porém, com agregado leve ocorreu o oposto, a saturação prévia reduziu o fluxo volumétrico da água dessas argamassas. Bem como, entre todas as argamassas com agregado poroso, quando utilizou-se o agregado seco previamente, as argamassas com agregado leve apresentaram os maiores valores do fluxo. Quando utilizado o agregado saturado previamente, os maiores valores do fluxo volumétrico da água foram obtidos nas argamassas com agregado reciclado.

Verificou-se que as amostras apresentam a tendência de conforme aumentou a distância percorrida pela água menor foi a resistência, uma vez que, a distância percorrida está diretamente ligada com o tempo de hidratação das amostras, ou seja, maior a distância percorrida quando a amostra tem 1 dia de hidratação e menor a distância quando a amostra apresenta 90 dias. Por isso, a resistência mecânica foi o inverso da distância percorrida.

5.3.2.3.5 Distribuição de fases da pasta de cimento

A composição volumétrica das argamassas foi calculada com base no modelo de Powers, de acordo com a Equação 1 a Equação 6. Os resultados são apresentados na Tabela 37.

À medida que a hidratação prossegue (de 1 para 28 dias), o cimento reagiu com a água e formou géis sólidos (o gel sólido ocupa menos espaço do que o cimento e à água a partir da qual é formado), aumentando a retração química e reduzindo o volume de água livre (água capilar). Na superfície desses géis sólidos é ligada, por forças de adsorção, a chamada água gel (água ligada quimicamente). Assim como, com o aumento da hidratação, reduziu o teor de cimento anidro, em todas as amostras (RILEM TC-196, 2007).

Com 1 dia de hidratação, as amostras de referência REF-RCC, RCC+SAT e ALV+SAT apresentaram comportamento semelhante à REF-AN, em todas as fases da pasta de cimento. A saturação prévia nas argamassas com agregado poroso reduziu o teor de água capilar e o teor de cimento anidro. Bem como, aumentou o teor de água gel e gel sólido, corroborando com os resultados de grau de hidratação. Pois, as argamassas com saturação prévia apresentaram propriedades melhoradas com 1 dia de hidratação. Com exceção, as argamassas com agregado reciclado e incorporação de 300 ppm de cromo e de zinco, nas quais a saturação prévia não foi eficaz, devido à alteração na microestrutura e à formação de novos produtos hidratados com presença dos metais. Esses

resultados corroboram com os resultados do ensaio de calor de hidratação, DRX e resistência mecânica (Tabela 37 e Figura 50).

Tabela 37: Distribuição de fases da pasta com 1 e 28 dias de hidratação.

COM 1 DIA DE HIDRATAÇÃO (m³/ m³ da pasta de cimento)						
	Material/ Argamassas	Retração química	Água capilar	Água gel	Gel sólido	Cimento não hidratado
	REF-AN	0,033	0,394	0,097	0,249	0,227
AN + RCC	REF	0,032	0,395	0,096	0,247	0,228
	Pb 300 ppm	0,028	0,426	0,083	0,212	0,252
	Cr 300 ppm	0,051	0,272	0,152	0,391	0,134
	Zn 300 ppm	0,046	0,305	0,138	0,353	0,159
	REF + SAT	0,033	0,389	0,099	0,255	0,223
	Pb 300 ppm + SAT	0,036	0,373	0,107	0,273	0,211
	Cr 300 ppm + SAT	0,030	0,410	0,090	0,231	0,239
	Zn 300 ppm + SAT	0,031	0,408	0,091	0,233	0,238
AN + ALV	REF	0,027	0,433	0,080	0,204	0,257
	Pb 300 ppm	0,024	0,449	0,072	0,185	0,269
	Cr 300 ppm	0,023	0,456	0,069	0,178	0,274
	Zn 300 ppm	0,026	0,439	0,077	0,197	0,262
	REF + SAT	0,033	0,392	0,098	0,251	0,226
	Pb 300 ppm + SAT	0,035	0,382	0,102	0,263	0,218
	Cr 300 ppm + SAT	0,028	0,425	0,083	0,213	0,251
	Zn 300 ppm + SAT	0,026	0,435	0,078	0,201	0,259
COM 28 DIAS DE HIDRATAÇÃO (m³/ m³ da pasta de cimento)						
	Material/ Argamassas	Retração química	Água capilar	Água gel	Gel sólido	Cimento não hidratado
AN + RCC	REF	0,066	0,177	0,195	0,501	0,061
	Cr 300 ppm	0,064	0,188	0,190	0,488	0,070
	Zn 300 ppm	0,066	0,177	0,195	0,501	0,061
	REF + SAT	0,065	0,180	0,194	0,497	0,063
	Cr 300 ppm + SAT	0,063	0,193	0,188	0,482	0,073
	Zn 300 ppm + SAT	0,065	0,182	0,193	0,495	0,065
AN + ALV	REF	0,067	0,168	0,199	0,511	0,054
	Cr 300 ppm	0,067	0,168	0,199	0,512	0,054
	REF + SAT	0,066	0,174	0,197	0,505	0,058
	Cr 300 ppm + SAT	0,066	0,177	0,195	0,501	0,061

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

Já, com 28 dias de hidratação, todas as amostras apresentaram, praticamente, os mesmos teores de retração química. A saturação prévia aumentou o teor de água capilar nas amostras com agregado leve e com agregado reciclado, enquanto reduziu o teor de água gel e de gel sólido, além disso, houve aumento da quantidade de cimento não hidratado, em

relação às argamassas com o agregado utilizado seco previamente. Esses resultados estão de acordo com o grau de hidratação determinado pelo ensaio de RMN (item 5.3.2.5.2), na qual, com 28 dias, as amostras preparadas com o agregado seco previamente obtiveram maior grau de hidratação e a maior resistência mecânica (item 5.3.2.2). As argamassas com agregado reciclado apresentaram o maior teor de cimento anidro e de água capilar, em relação às amostras com agregado leve (Tabela 37 e Figura 51).

Figura 50: Distribuição de fases da pasta de cimento com 1 dia de hidratação.

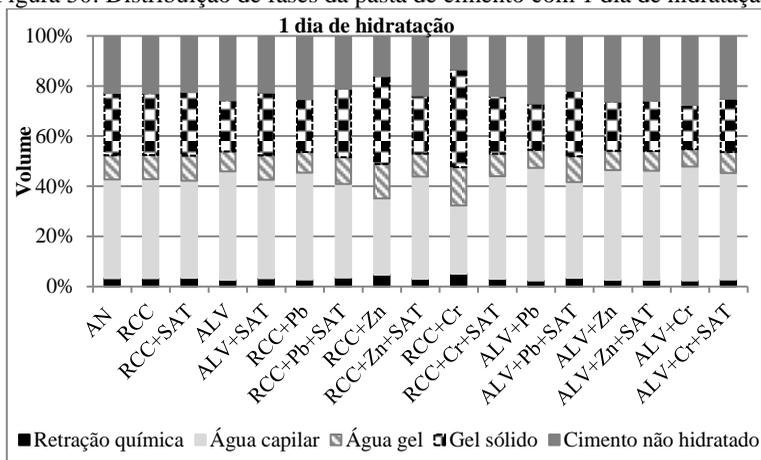
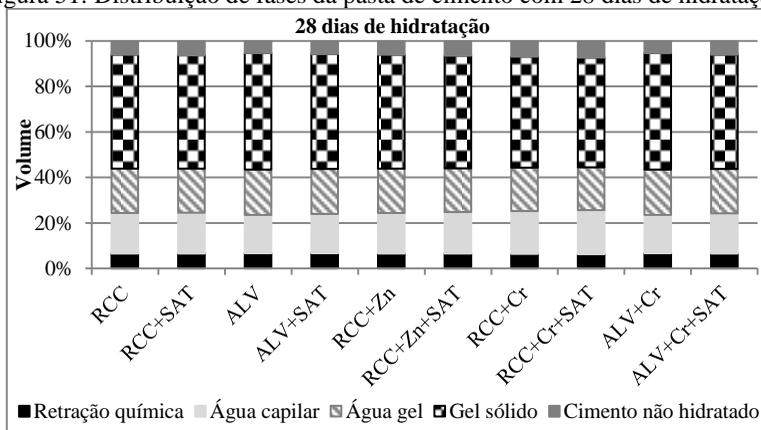


Figura 51: Distribuição de fases da pasta de cimento com 28 dias de hidratação.



5.3.2.4 Compatibilidade ambiental

5.3.2.4.1 Ensaio de tanque

O ensaio de lixiviação desempenha um papel vital na avaliação dos efeitos potenciais de eliminação de resíduos no ambiente. O ensaio foi realizado em amostras monolíticas das argamassas com agregado reciclado ou agregado leve e incorporação de cromo, zinco ou chumbo, o resultado acumulativo das 8 extrações (64 dias de ensaio) são apresentados na Tabela 38. Sendo que a presença de cálcio, titânio, ferro, cobre, estrôncio e níquel são derivados dos agregados e do cimento utilizado (verificado na análise química do cimento e após o ensaio de lixiviação nos agregados, item 4.1.2 e 5.1.4, respectivamente), bem como, os metais incorporados (cromo, zinco e chumbo) também estavam presentes nos materiais utilizados para o preparo das argamassas.

Em relação às argamassas com agregado reciclado verificou-se que, apenas ocorreu liberação do metal pesado incorporado na argamassa (zinco, cromo e chumbo) em teor superior ao presente nas argamassas de referências sem molhagem prévia (REF-RCC) nas argamassas RCC+ Zn 100 ppm e RCC+ Zn 300 ppm (com liberação de 23 e 28 ppm, respectivamente). Assim como, em relação à RCC+SAT, ocorreu liberação em todas as argamassas com molhagem prévia (exceção para a argamassa RCC+ Zn 100 ppm+ SAT): na argamassa com 100 ppm de chumbo liberou 29,4 ppm, com 300 ppm de chumbo liberou 32 ppm, com 300 ppm de zinco liberou 10 ppm e nas argamassas com 100 e 300 ppm de cromo liberaram 47 e 58,6 ppm, respectivamente.

Já, em relação à argamassa de referência com agregado leve sem molhagem prévia (REF-ALV), apenas as seguintes amostras liberaram maior teor de metal pesado: ALV+ Pb 100 ppm (1 ppm) e ALV+ Cr 300 ppm (17,8 ppm). Enquanto que, as amostras com saturação prévia do agregado leve liberaram 6,5 e 14,6 ppm, respectivamente para a amostra com 100 ppm e 300 ppm de cromo, em relação à amostra ALV+SAT (Tabela 38). Essa redução da lixiviação ocorreu pela diminuição da área superficial exposta à lixiviação e pelo isolamento dos resíduos em poros impermeáveis, uma vez que as argamassas apresentaram baixa porosidade e baixa absorção.

Tabela 38: Liberação acumulada das 8 extrações do ensaio de tanque, em mg/L.

Argamassas	Ca	Fe	Cu	Cr	Pb	Zn	Ti	Ni	Sr
REF	846,2	316,0	273,8	272,2	237,8	117,2	214,1	83,9	57,5
Pb 100 ppm	1224,5	303,9	274,1	263,8	219,3	125,2	95,9	77,2	51,9
Cr 100 ppm	1219,9	292,2	279,9	227,7	225,5	128,3	157,6	89,5	71,3
Zn 100 ppm	835,6	270,0	293,5	157,0	233,8	140,2	39,9	87,1	57,5
Pb 300 ppm	1408,1	278,9	273,5	211,3	218,5	130,8	209,7	76,5	73,1
Cr 300 ppm	962,7	292,5	269,8	236,7	250,2	147,8	160,7	106,9	49,9
Zn 300 ppm	878,7	272,4	271,2	233,6	211,9	145,3	237,3	99,7	52,6
AN + RCC									
REF + SAT	1046,4	339,9	266,4	213,2	196,2	128,7	169,4	79,6	59,6
Pb 100+SAT	1141,2	288,4	284,5	250,9	225,6	138,9	201,9	95,8	61,7
Cr 100+SAT	1251,0	301,7	292,5	260,0	220,5	135,7	61,9	67,1	69,1
Zn 100+SAT	956,4	292,9	284,0	215,8	221,9	126,4	165,1	104,9	48,8
Pb 300+SAT	841,7	294,0	273,7	184,5	227,8	135,4	173,5	68,7	51,5
Cr 300+SAT	1144,7	290,6	306,2	271,8	236,6	135,7	96,5	73,7	70,2
Zn 300+SAT	1369,9	324,2	299,2	208,5	224,9	138,7	111,2	116,0	63,5
AN + ALV									
REF	1089,4	254,7	277,5	274,6	238,0	138,6	62,2	73,6	48,3
Pb 100 ppm	1091,6	270,5	291,4	222,9	239,1	141,2	99,9	95,3	56,0
Cr 100 ppm	1386,7	331,9	269,5	204,7	216,9	145,4	157,7	78,0	65,7
Zn 100 ppm	911,4	315,5	264,9	175,6	214,9	132,4	110,3	84,1	73,1
Pb 300 ppm	1055,2	248,9	316,8	189,6	199,4	133,0	125,0	67,6	37,6
Cr 300 ppm	852,8	279,5	281,8	292,4	268,9	142,4	300,6	78,0	48,6
Zn 300 ppm	982,2	297,3	281,8	121,5	257,6	121,9	103,1	107,4	60,3
REF + SAT	1004,3	287,3	265,8	213,6	239,5	157,3	94,7	86,9	51,5
Pb 100+SAT	1286,7	300,4	283,8	241,4	231,5	140,1	212,5	75,3	63,7
Cr 100+SAT	1183,5	267,2	290,5	220,1	213,6	146,5	207,9	48,4	60,7
Zn 100+SAT	997,2	269,7	286,5	268,9	234,2	140,9	160,1	79,3	59,9
Pb 300+SAT	1594,9	314,7	283,9	209,9	202,4	144,3	100,3	68,8	53,6
Cr 300+SAT	1511,5	322,8	265,6	228,2	248,7	125,0	115,6	113,8	63,6
Zn 300+SAT	1025,4	293,0	247,8	237,7	224,5	136,6	235,5	70,5	57,5

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

Na Tabela 39 têm-se a porcentagem de retenção dos metais pesados de interesse (chumbo, cromo e zinco), em relação ao teor presente na argamassa de referência e com relação ao teor de metal incorporado (Equação 34).

$$\% \text{ retenção} = 100 - \left[\frac{(\text{Lix} - \text{REF}) \times 100}{\text{Teor de metal}} \right] \quad \text{Equação 34}$$

Onde:

Lix = Teor do metal de interesse lixiviado na amostra contaminada (ppm);
 REF = Teor do metal de interesse lixiviado na amostra de referência (ppm);
 Teor de metal = Teor de metal incorporado (100 ou 300 ppm).

Verificou-se que as argamassas com agregado poroso (agregado leve e agregado reciclado), quando utilizadas com o agregado seco previamente, auxiliaram para uma maior retenção dos metais pesados, com 4 das 6 amostras resultando 100 % de retenção. As argamassas com o agregado reciclado seco previamente não foram eficientes para reter o zinco, porém, conseguiram reter os 300 ppm de cromo hexavalente incorporado. Enquanto que, as amostras com agregado leve seco previamente não foram eficientes para reter 100 % do chumbo e do cromo, porém apresentaram retenção de 99 % quando incorporado 100 ppm de chumbo e de 94 % quando incorporado outro para 300 ppm de cromo.

Tabela 39: Retenção dos metais de interesse pelas argamassas.

Argamassas		Retenção	Argamassas		Retenção
AN + RCC	REF	-	REF	-	
	Pb 100 ppm	201,6 %	Pb 100 ppm	98,9 %	
	Cr 100 ppm	127,0 %	Cr 100 ppm	322,9 %	
	Zn 100 ppm	77,0 %	Zn 100 ppm	115,3 %	
	Pb 300 ppm	275,6 %	Pb 300 ppm	112,9 %	
	Cr 300 ppm	151,8 %	Cr 300 ppm	94,1 %	
	Zn 300 ppm	90,6 %	Zn 300 ppm	119,4 %	
	REF + SAT	-	REF + SAT	-	
	Pb 100 ppm + SAT	70,6 %	Pb 100 ppm + SAT	121,2 %	
	Cr 100 ppm + SAT	53,1 %	Cr 100 ppm + SAT	93,5 %	
	Zn 100 ppm + SAT	108,0 %	Zn 100 ppm + SAT	141,9 %	
Pb 300 ppm + SAT	89,5 %	Pb 300 ppm + SAT	139,1 %		
Cr 300 ppm + SAT	80,5 %	Cr 300 ppm + SAT	95,1 %		
Zn 300 ppm + SAT	96,7 %	Zn 300 ppm + SAT	122,4 %		
AN + ALV	REF	-	REF	-	
	Pb 100 ppm	201,6 %	Pb 100 ppm	98,9 %	
	Cr 100 ppm	127,0 %	Cr 100 ppm	322,9 %	
	Zn 100 ppm	77,0 %	Zn 100 ppm	115,3 %	
	Pb 300 ppm	275,6 %	Pb 300 ppm	112,9 %	
	Cr 300 ppm	151,8 %	Cr 300 ppm	94,1 %	
	Zn 300 ppm	90,6 %	Zn 300 ppm	119,4 %	
	REF + SAT	-	REF + SAT	-	
	Pb 100 ppm + SAT	70,6 %	Pb 100 ppm + SAT	121,2 %	
	Cr 100 ppm + SAT	53,1 %	Cr 100 ppm + SAT	93,5 %	
	Zn 100 ppm + SAT	108,0 %	Zn 100 ppm + SAT	141,9 %	
Pb 300 ppm + SAT	89,5 %	Pb 300 ppm + SAT	139,1 %		
Cr 300 ppm + SAT	80,5 %	Cr 300 ppm + SAT	95,1 %		
Zn 300 ppm + SAT	96,7 %	Zn 300 ppm + SAT	122,4 %		

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

Contudo, ao verificar as argamassas com saturação prévia do agregado, fica claro que o agregado leve foi mais eficiente, não conseguindo reter 100% apenas das amostras com cromo, nas quais sua eficiência foi superior a 93 %. Já, nas amostras com saturação prévia do agregado reciclado, somente na amostra com 100 ppm de zinco houve 100 % de retenção do metal, enquanto que o pior índice foi da argamassa RCC+ Cr 100 ppm+ SAT, que obteve 53 % de retenção. A lixiviação do cromo pode ocorrer através do mecanismo de difusão que controla a liberação dos compostos de cromo ligeiramente ligados, presente perto da superfície das fases sólidas. Ou a diminuição do gradiente de concentração entre a fase líquida e a fase sólida pode causar um pequeno aumento de cromo no lixiviado (SINYOUNG *et al.*, 2011). Outra constatação, é que a retenção dos metais pesados é sempre superior quando

incorporado o maior teor de metal, devido à capacidade de tamponamento do metal pesado (Tabela 39).

Essa diferença, no comportamento quando utilizado o agregado saturado ou seco previamente, foi devido ao período em que o agregado poroso foi eficiente como agente de cura interna. Isto é, quando os agregados são utilizados secos previamente, ao entrar em contato com a água de amassamento saturada com o metal pesado, o mesmo funciona como um sorvente químico e absorve/ adsorve o metal pesados juntamente com a água, e como essa água será liberada apenas em idades tardias, o metal não é totalmente liberado, por preenchimento dos poros do agregado com pasta de cimento ou por estar retido em algum poro muito pequeno do agregado. Quando o agregado foi utilizado saturado previamente com água destilada/ deionizada e com o metal pesado, o agregado absorveu/ adsorveu o metal e, colocando-se a argamassa em contato com diferentes umidades relativas, libera-se a água do interior do agregado e conseqüentemente, também, o metal pesado. No entanto, uma fração do metal pesado ficou retida no interior do agregado, outra parte foi ligada com os produtos hidratados do cimento, por sorção, substituição ou por precipitação de uma nova fase, e a parte lixiviada ficou apenas adsorvido na superfície dos grãos de cimento anidros ou nos poros da argamassa. Esses resultados estão de acordo com os resultados de resistência mecânica, DRX e MEV (Tabela 39).

A baixa lixiviação do chumbo pode ser explicada pela sua imobilização no C-S-H, que é uma fase resistente à lixiviação. De acordo com Gineys, Aouad e Damidot (2010), como os raios atômicos do chumbo e do cálcio são próximos (13 %), o chumbo pode substituir o cálcio no C-S-H. Bem como, Moulin *et al.* (2000) verificou, pelo ensaio de RMN ^{29}Si e ^{27}Al , a existência de ligações de Si-O-Pb e Ca-O-Pb, concluindo que o chumbo é ligado no tetraedro do silício no C-S-H.

A alta retenção do zinco e do cromo pelas argamassas, também, é devido às suas imobilizações no C-S-H, uma vez que, esses metais foram ligados no tetraedro do silício no C-S-H. Corroborando com as fases encontradas na difração de raios-X (item 5.3.2.5.3), com o ensaio de RMN e com Moulin *et al.* (2000).

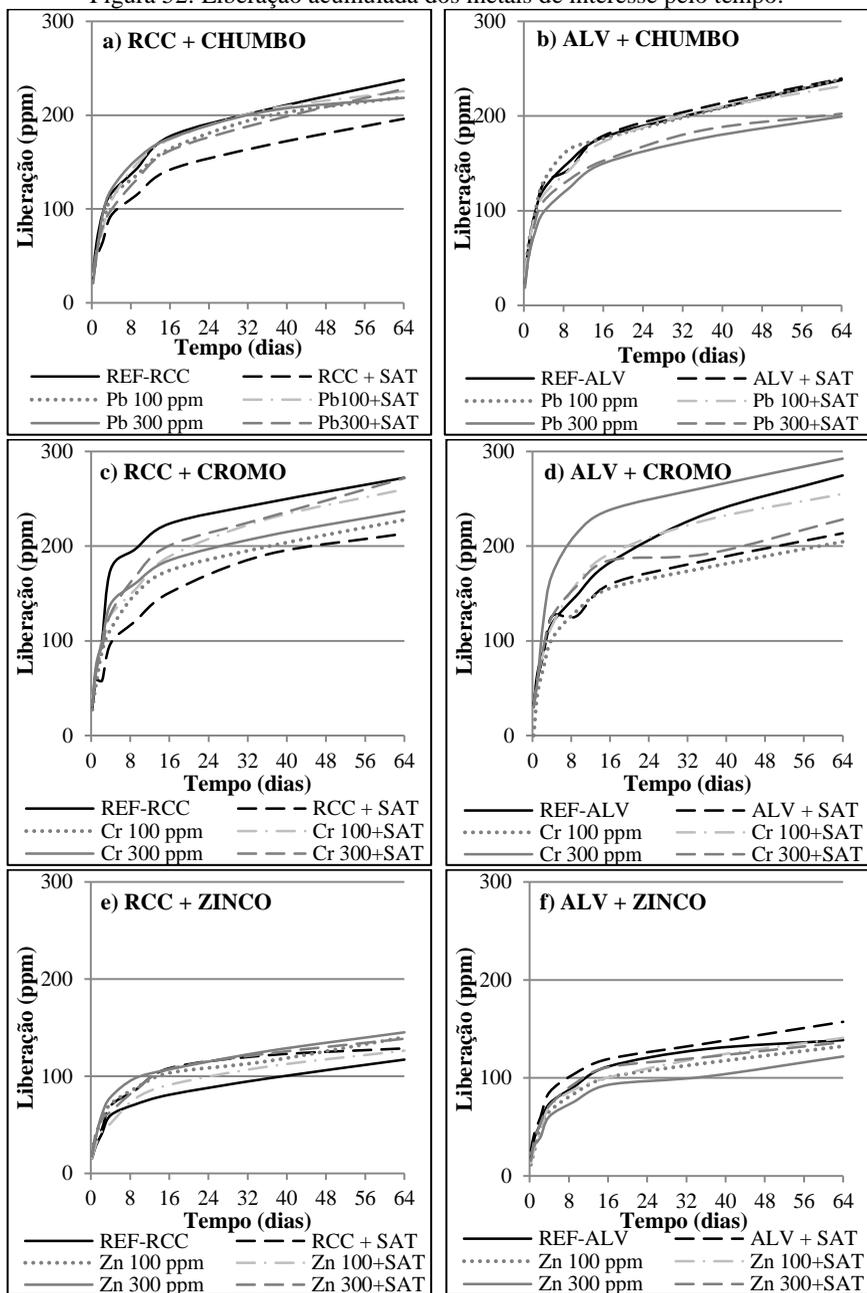
Na Figura 52 são apresentados os resultados da liberação acumulada dos metais pesados (chumbo, cromo e zinco) em função do tempo. Em relação à liberação de chumbo, Figura 52-a e Figura 52-b, verificou-se que nas argamassas com agregado reciclado e com agregado leve, a maior concentração de chumbo foi obtidos nas referências (REF-RCC, REF-ALV e ALV+SAT). Ou seja, as argamassas com incorporação de

metal, conseguiram reter um teor superior em sua estrutura do que as argamassas que possuíam este metal oriundo da matéria prima utilizada.

Percebe-se, na Figura 52-c, que a argamassa com agregado reciclado que apresentou a maior liberação de cromo foi à referência (REF-RCC) na quarta extração (4 dias de ensaio), com um pico de liberação de 74 ppm. As argamassas com incorporação de 100 e 300 ppm de cromo, tanto com os agregados saturados, quanto secos previamente, apresentaram uma lixiviação constante, com liberações em cada extração inferiores a 40 ppm. Na Figura 52-d nota-se que, diferentemente das argamassas com agregado reciclado, a maior liberação de cromo ocorreu nas argamassas com agregado leve com incorporação de 300 ppm sem molhagem prévia do agregado (ALV+ Cr 300 ppm), com liberação de 65 ppm na terceira extração (2 dias de contato com o líquido lixiviante). O cromo hexavalente, por apresentar à carga idêntica e raios comparáveis, 2,3 Å e 2,4 Å, respectivamente do sulfato (SO_4^{2-}) e do cromato (CrO_4^{2-}), pode substituir o sulfato na estrutura da etringita e do monossulfato e, conseqüentemente, formar soluções sólidas. Sendo que, a formação de soluções sólidas pode diminuir a solubilidade dos sólidos, reduzindo as concentrações de lixiviação do cromato (KINDNESS, MACIAS e GLASSER, 1994; GOUGAR, SCHEETZ e ROY, 1996; LEISINGER *et al.*, 2012; VOLLPRACHT e BRAMESHUBER, 2016).

As argamassas com agregado leve e com agregado reciclado apresentaram uma forte retenção do zinco, sendo que não ocorreu liberação do metal em teor superior a 30 ppm, em relação às respectivas referências (Figura 52-e-f). Para Gineys, Aouad e Damidot (2011) o zinco quando incorporado na pasta de cimento em forma de sal de nitrato está presente em hidratos em torno dos grãos anidros. Isto é, o zinco é fortemente retido pelo C_4AF e pelo C-S-H , evitando a sua liberação para o meio ambiente (MOULIN *et al.*, 2000; GINEYS, AOUAD e DAMIDOT (2010 e 2011)).

Figura 52: Liberação acumulada dos metais de interesse pelo tempo.



Na Tabela 40 são apresentados os valores utilizados para o cálculo do coeficiente de difusão para a liberação acumulada após as 8 extrações, determinadas em relação ao teor de cromo, zinco e chumbo presente em cada amostra. Sendo que, em todas as argamassas foram determinadas como média mobilidade do contaminante. Ao verificar o coeficiente de difusão para cada extração em separado, em todos os casos, foi considerado como baixa mobilidade, sendo considerado imobilizado o contaminante no produto S/E.

Tabela 40: Coeficiente de difusão para o metal de interesse.

	Material/ Argamassas	$\epsilon 64$ (mg/m ²)	De (m ² /s)	-logDe	Coeficiente de Difusão
AN + RCC	Pb 100 ppm	13294,8	1,3E-12	11,88	Média mobilidade
	Cr 100 ppm	14375,2	1,6E-12	11,80	Média mobilidade
	Zn 100 ppm	8848,8	2,1E-12	11,68	Média mobilidade
	Pb 300 ppm	13680,9	9,1E-13	12,04	Média mobilidade
	Cr 300 ppm	14943,2	1,1E-12	11,96	Média mobilidade
	Zn 300 ppm	8948,9	1,2E-12	11,93	Média mobilidade
	Pb 100 ppm + SAT	14123,7	2,5E-12	11,60	Média mobilidade
	Cr 100 ppm + SAT	15519,0	3,9E-12	11,41	Média mobilidade
	Zn 100 ppm + SAT	7726,0	2,2E-12	11,66	Média mobilidade
	Pb 300 ppm + SAT	14381,1	1,6E-12	11,80	Média mobilidade
	Cr 300 ppm + SAT	16744,1	2,4E-12	11,62	Média mobilidade
	Zn 300 ppm + SAT	8475,7	1,3E-12	11,89	Média mobilidade
AN + ALV	Pb 100 ppm	14611,7	2,8E-12	11,55	Média mobilidade
	Cr 100 ppm	13133,6	2,0E-12	11,69	Média mobilidade
	Zn 100 ppm	8289,0	1,9E-12	11,72	Média mobilidade
	Pb 300 ppm	12186,2	1,2E-12	11,91	Média mobilidade
	Cr 300 ppm	18163,6	2,2E-12	11,65	Média mobilidade
	Zn 300 ppm	7635,1	8,0E-13	12,10	Média mobilidade
	Pb 100 ppm + SAT	14264,6	2,3E-12	11,64	Média mobilidade
	Cr 100 ppm + SAT	15843,1	4,1E-12	11,39	Média mobilidade
	Zn 100 ppm + SAT	8819,4	2,2E-12	11,66	Média mobilidade
	Pb 300 ppm + SAT	12673,3	1,1E-12	11,96	Média mobilidade
	Cr 300 ppm + SAT	14176,6	1,8E-12	11,74	Média mobilidade
	Zn 300 ppm + SAT	8619,3	1,0E-12	12,00	Média mobilidade

A maior variação dos dados ocorreu, em todos os casos, nas primeiras idades, uma vez que nesse período ocorreu a maior mobilidade iônica, pois quando as argamassas foram colocadas no tanque com o líquido lixiviante os compostos do cimento continuam a se hidratar, e com o aumento da hidratação diminuiu o tamanho dos poros e consequentemente diminuiu a mobilidade iônica. Em resumo, o comportamento das argamassas frente ao coeficiente de difusão não foi afetado

pelo metal pesado incorporado e pelo tipo do agregado utilizado, uma vez que, de modo geral, as argamassas apresentaram valores de De e ρ De semelhantes.

Na Tabela 41 são apresentados os mecanismos de lixiviação das argamassas para o metal de interesse, separado por incremento, de acordo com a norma EA NEN 7375 (2004).

Tabela 41: Mecanismo de lixiviação do metal de interesse.

Argamassas		2-7	5-8	4-7	3-6	2-5	1-4
AN + RCC	Pb 100 ppm	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.
	Cr 100 ppm	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.
	Zn 100 ppm	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.
	Pb 300 ppm	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.
	Cr 300 ppm	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.
	Zn 300 ppm	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.
	Pb 100 ppm + SAT	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.	Dif.
	Cr 100 ppm + SAT	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.
	Zn 100 ppm + SAT	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.	L.S.
	Pb 300 ppm + SAT	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	L.S.
	Cr 300 ppm + SAT	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.
	Zn 300 ppm + SAT	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	L.S.
AN + ALV	Pb 100 ppm	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.
	Cr 100 ppm	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	L.S.
	Zn 100 ppm	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	Dsol
	Pb 300 ppm	Dif.	Esg.	Esg.	Esg.	Dsol.	Dsol
	Cr 300 ppm	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.	Dsol
	Zn 300 ppm	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.	Dif.
	Pb 100 ppm + SAT	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.
	Cr 100 ppm + SAT	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.	Dif.
	Zn 100 ppm + SAT	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	Dsol
	Pb 300 ppm + SAT	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.
	Cr 300 ppm + SAT	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.
	Zn 300 ppm + SAT	L.S.	Esg.	Esg.	Esg.	Esg.	Dif.

Nota: L.S.=lavagem superficial; Dif.=difusão; Dsol.=dissolução; Esg.=esgotamento.

Nas argamassas com agregado reciclado e sem saturação prévia do agregado, o mecanismo de lixiviação em cada incremento foi o mesmo em todas as argamassas, não variando pelo teor ou pelo metal incorporado. Assim como, para todas as amostras ensaiadas, o mecanismo de lixiviação foi o mesmo nos incrementos 2-7 (lavagem superficial, com exceção da amostra ALV+ Pb 300 ppm, na qual o mecanismo foi difusão), 5-8, 4-7 e 3-6 (depleção/ esgotamento). Enquanto que no incremento 2-5 o mecanismo variou de esgotamento, difusão e dissolução, com a maioria das amostras apresentando o mecanismo de esgotamento.

Já no incremento 1-4, o mecanismo principal foi à difusão, com algumas amostras apresentando lavagem superficial e dissolução.

A condutividade é uma medida aproximada da concentração de eletrólitos na solução aquosa. Indiretamente indica o teor de mineral na água. Como também existe uma relação entre a condutividade e o volume de substâncias dissolvidas no líquido lixiviado. Na Tabela 42 são apresentados os resultados de condutividade elétrica do líquido lixiviado das amostras nos tempos determinados. De modo geral, a condutividade aumentou até a quinta extração e em seguida reduziu até o final do ensaio, sendo a maior condutividade elétrica encontrada na quinta extração, em todas as amostras.

Tabela 42: Condutividade elétrica do líquido lixiviante após cada extração do ensaio de tanque das argamassas.

Material/ Argamassas	Condutividade elétrica em cada extração ($\mu\text{S}/\text{cm}$)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
REF	525,9	728,2	831,2	851,6	1290,9	967,7	1036,0	624,9	
Pb 100 ppm	314,0	758,2	862,8	833,4	1158,7	837,4	1099,2	657,9	
Cr 100 ppm	445,7	777,4	885,3	703,9	1134,4	888,6	1124,9	670,0	
Zn 100 ppm	588,1	866,2	846,5	790,8	1286,6	752,3	583,5	354,6	
Pb 300 ppm	490,7	839,5	855,5	771,5	1022,4	831,3	932,2	523,1	
Cr 300 ppm	432,2	761,1	887,8	853,3	1189,0	887,8	1022,9	652,2	
Zn 300 ppm	467,2	703,1	849,2	716,8	1250,0	875,9	781,5	554,2	
AN + RCC	REF + SAT	675,5	809,3	866,6	731,1	1132,2	824,0	872,5	547,2
	Pb 100 + SAT	397,7	779,7	929,0	830,3	1209,7	972,1	1201,6	707,1
	Cr 100 + SAT	550,4	685,0	911,3	844,9	1173,7	856,3	912,2	623,7
	Zn 100 + SAT	451,9	750,6	964,8	907,7	1303,9	1026,7	1151,4	720,9
	Pb 300 + SAT	677,7	860,0	911,5	804,2	1113,5	959,6	1111,0	631,9
	Cr 300 + SAT	245,7	661,3	868,7	873,5	1346,7	1047,5	1304,0	850,1
	Zn 300 + SAT	404,5	741,0	829,5	889,6	1356,5	1027,3	1179,1	830,1
AN + ALV	REF	448,6	764,2	815,5	848,9	1196,7	899,0	910,5	466,6
	Pb 100 ppm	548,3	764,6	851,1	850,8	1258,1	984,3	917,9	481,8
	Cr 100 ppm	233,5	677,1	748,8	706,2	1120,6	915,7	1073,1	870,5
	Zn 100 ppm	297,4	681,8	810,3	848,1	1179,6	769,2	528,0	220,3
	Pb 300 ppm	364,8	746,6	816,7	836,6	1202,4	945,3	966,7	543,9
	Cr 300 ppm	200,7	601,3	713,0	789,2	1158,8	951,6	986,0	771,4
	Zn 300 ppm	390,3	799,6	846,4	814,8	1223,3	917,0	779,2	417,7
	REF + SAT	646,3	696,4	655,2	668,7	985,5	764,0	609,8	827,8
	Pb 100 + SAT	221,0	699,9	694,3	644,5	1123,5	991,0	1014,6	837,2
	Cr 100 + SAT	425,6	675,3	712,8	828,4	1039,1	1001,7	1149,4	884,8
	Zn 100 + SAT	392,9	687,0	721,0	688,6	817,1	720,7	631,1	887,2
	Pb 300 + SAT	211,6	587,3	690,3	732,7	1015,1	976,2	1088,2	622,7
	Cr 300 + SAT	359,1	629,8	715,4	753,0	1279,0	1055,8	1231,3	1021,9
	Zn 300 + SAT	209,6	541,8	529,7	577,3	850,6	721,3	687,6	1047,3

Os valores de pH do líquido lixiviante após cada extração são apresentados na Tabela 43. O pH das amostras apresentaram o mesmo perfil de comportamento (aumentou o pH com o tempo, até a terceira extração, manteve-se constante até a sétima extração, e na última extração voltou a diminuir), apresentando pH alcalino, em todos os casos. Para Moulin *et al.* (2000) o cromo hexavalente é altamente solúvel em pH alcalino, porém essa afirmação não esta de acordo com este estudo, pois o cromo apresentou baixa solubilidade.

Tabela 43: pH do líquido lixiviante após cada extração do ensaio de tanque.

Material/ Argamassas	pH em cada extração								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
AN + RCC	REF	12,72	12,81	13,02	12,94	13,36	13,23	13,38	13,11
	Pb 100 ppm	12,30	12,91	13,03	13,20	13,21	13,29	13,35	13,17
	Cr 100 ppm	12,50	12,88	13,03	13,16	13,30	13,27	13,39	13,13
	Zn 100 ppm	12,73	12,93	13,01	13,14	13,30	13,18	13,10	12,77
	Pb 300 ppm	12,67	13,13	13,12	13,15	13,22	13,27	13,30	13,07
	Cr 300 ppm	12,56	12,93	13,08	13,19	13,37	13,26	13,38	13,20
	Zn 300 ppm	12,62	13,02	12,98	13,15	13,33	13,24	13,21	13,04
	REF + SAT	12,82	12,96	13,11	13,02	13,23	13,22	13,33	13,12
	Pb 100 + SAT	12,50	12,94	12,98	13,20	13,27	13,28	13,38	13,18
	Cr 100 + SAT	12,71	12,82	13,07	13,25	13,33	13,27	13,30	13,16
	Zn 100 + SAT	12,60	12,89	13,03	13,25	13,35	13,37	13,39	13,18
	Pb 300 + SAT	12,83	13,05	13,14	13,18	13,28	13,27	13,38	13,15
	Cr 300 + SAT	11,59	12,84	13,02	13,24	13,38	13,38	13,48	13,26
	Zn 300 + SAT	12,46	13,03	13,01	13,20	13,38	13,33	13,46	13,23
AN + ALV	REF	12,52	12,91	12,88	13,11	13,35	13,18	13,34	13,06
	Pb 100 ppm	12,61	12,94	12,94	13,06	13,37	13,21	13,37	12,99
	Cr 100 ppm	12,11	12,83	12,90	12,92	13,21	13,27	13,45	13,29
	Zn 100 ppm	12,11	12,88	12,95	12,98	13,33	13,22	13,13	12,47
	Pb 300 ppm	12,43	12,89	12,96	13,10	13,38	13,21	13,40	13,05
	Cr 300 ppm	11,58	12,74	12,92	12,97	13,26	13,26	13,42	13,26
	Zn 300 ppm	12,37	12,99	12,94	13,06	13,36	13,19	13,26	12,95
	REF + SAT	12,75	12,95	13,14	13,08	13,23	13,19	13,20	13,21
	Pb 100 + SAT	11,79	12,86	12,98	13,13	13,35	13,33	13,44	13,24
	Cr 100 + SAT	12,53	12,81	12,96	12,97	13,23	13,30	13,42	13,31
	Zn 100 + SAT	12,63	12,88	12,90	13,00	13,18	13,16	13,24	13,27
	Pb 300 + SAT	11,25	12,83	13,09	13,07	13,34	13,31	13,44	13,24
	Cr 300 + SAT	12,47	12,80	12,87	12,95	13,33	13,32	13,51	13,33
	Zn 300 + SAT	9,26	12,76	12,76	12,99	13,17	13,12	13,25	13,31

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

5.3.2.4.2 Ensaio de lixiviação de acordo com NBR 10005

Na Tabela 44 são apresentadas as concentrações dos elementos químicos lixiviados após 18 horas do contato da amostra com a solução de ácido acético. Nas amostras de referência foram encontrados metais pesados oriundos do cimento e do agregado utilizado. Considerando que, as amostras de referências são inertes, pode-se considerar inertes as amostras com incorporação de metal pesado que liberaram concentração inferior à amostra de referência. Em relação aos outros metais liberados, todas as argamassas liberaram cobre, zinco, estrôncio, chumbo, níquel, ferro e cromo.

Tabela 44: Concentrações dos elementos lixiviados das argamassas, em mg/L.

Argamassas	Ca	Pb	Cr	Zn	Fe	Cu	Sr	Ni
REF	3441,4	49,8	38,9	19,7	51,1	33,8	20,4	17,4
Pb 100 ppm	3797,2	30,4	31,5	16,3	42,5	34,9	16,9	N.D.
Cr 100 ppm	3036,0	27,6	31,1	18,6	31,6	26,7	13,2	N.D.
Zn 100 ppm	3540,8	26,0	31,8	23,8	66,9	33,0	14,1	N.D.
Pb 300 ppm	3127,6	43,5	N.D.	16,1	33,9	33,9	18,3	16,0
Cr 300 ppm	3382,4	44,3	25,2	17,9	48,8	40,9	13,2	N.D.
Zn 300 ppm	137,1	19,3	41,8	21,9	24,2	34,2	4,4	11,9
REF + SAT	3050,4	13,4	26,2	13,6	49,6	25,6	15,7	11,4
Pb 100+SAT	4544,0	19,1	29,3	14,9	39,5	39,2	19,6	18,5
Cr 100+SAT	3608,7	34,4	38,1	13,1	33,9	35,2	20,2	15,5
Zn 100+SAT	3293,3	25,2	45,8	10,6	32,1	25,6	14,8	N.D.
Pb 300+SAT	4011,5	26,1	40,5	32,8	44,3	44,0	12,9	18,5
Cr 300+SAT	3159,0	31,3	51,3	20,3	51,9	42,3	18,7	N.D.
Zn 300+SAT	121,4	27,4	25,6	20,4	36,1	39,0	6,1	N.D.
REF	3854,3	28,8	28,9	19,0	106,8	22,9	17,2	16,8
Pb 100 ppm	3466,8	26,4	36,2	13,2	49,2	39,1	18,6	12,2
Cr 100 ppm	3261,7	12,8	16,4	14,6	45,7	33,9	13,8	N.D.
Zn 100 ppm	3378,4	19,8	20,9	25,1	37,1	34,3	18,6	10,8
Pb 300 ppm	3327,8	21,3	31,3	25,4	42,3	40,6	14,6	N.D.
Cr 300 ppm	3683,1	26,8	31,3	18,0	28,6	35,6	18,4	27,7
Zn 300 ppm	3283,8	19,6	20,7	11,7	33,5	39,0	16,0	9,5
REF + SAT	3633,2	20,2	24,5	15,9	94,3	23,7	16,7	10,4
Pb 100+SAT	3440,1	30,9	24,9	16,7	51,0	28,9	15,9	11,8
Cr 100+SAT	3604,1	20,0	35,4	14,4	37,5	31,7	14,7	11,9
Zn 100+SAT	3027,0	29,4	37,8	22,2	48,3	36,4	17,5	10,5
Pb 300+SAT	3354,3	17,9	N.D.	22,3	42,0	38,5	16,3	12,2
Cr 300+SAT	3100,4	39,0	37,6	19,5	42,6	32,9	18,9	N.D.
Zn 300+SAT	3442,2	24,5	43,6	18,5	16,7	27,9	13,9	10,3

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco; N.D. = não detectado.

A liberação de cálcio foi acima de 3000 ppm em quase todas as amostras, com exceção para as amostras com agregado reciclado e incorporação de 300 ppm de zinco com e sem saturação prévia do agregado, que liberaram, respectivamente 121 e 137 ppm. Sabendo-se que a liberação de cálcio está diretamente ligada a dissolução da matriz, pode-se concluir que nessas amostras a dissolução da matriz foi ínfima, e que os metais pesados lixiviados estavam retidos ou adsorvidos nos poros da amostra ou dos agregados. Nas amostras com agregado leve a liberação de cálcio foi sempre inferior às referências, já nas amostras com agregado reciclado em algumas amostras a liberação de cálcio foi superior (Pb 100 ppm, Pb 100 ppm + SAT, Pb 300 ppm + SAT, Cr 100 ppm + SAT, Cr 300 ppm + SAT, Zn 100 ppm e Zn 100 ppm + SAT), devido ao agregado reciclado ser formado por agregado natural com pasta de cimento aderida na superfície (Tabela 44).

De acordo com a Tabela 45, a saturação prévia do agregado reduziu a retenção das argamassas e dos agregados, em relação às amostras produzidas sem saturação prévia. Em razão que, quando o agregado poroso é utilizado seco previamente, ao entrar em contato com a água de amassamento com o metal pesado, o agregado ao absorver a água, também absorveu/ adsorveu o metal pesado, e como essa água absorvida será liberada em idades tardias, com o progresso da hidratação criou-se uma zona de transição interfacial menos porosa e permeável, com produtos hidratados ou grãos de cimento nos poros do agregado, o que dificulta a posterior liberação desse metal. Enquanto que ao utilizar o agregado saturado previamente com o metal pesado, uma parte do metal pesado será prontamente liberada dos grãos juntamente com a água para a cura interna. Entretanto, em todos os casos, as argamassas retiveram, pelo menos, 88 % do teor de metal pesado incorporado.

Conforme observado na Tabela 46, o pH de todas as amostras foi superior a 7, ou seja alcalino. Quanto menor o pH das argamassas maior é a liberação de hidróxido de cálcio, uma vez que o caráter básico das soluções está ligado à liberação de hidróxido de cálcio das argamassas. Já, a condutividade elétrica das argamassas foram entre 5,8 a 7,8 mS/cm. Sendo que a liberação de hidróxido de cálcio também influencia na condutividade elétrica, pois quanto maior o teor de hidróxido de cálcio no líquido lixiviante, maior a condutividade elétrica. Estando de acordo com a liberação de cálcio obtida no líquido lixiviado, uma vez que as amostras com menor teor de cálcio apresentaram as menores condutividades elétricas.

Tabela 45: Porcentagem de retenção das argamassas após ensaio em meio ácido.

Argamassas		Retenção	Argamassas		Retenção
AN + RCC	REF	-	REF	-	
	Pb 100 ppm	119,4 %	Pb 100 ppm	102,5 %	
	Cr 100 ppm	107,8 %	Cr 100 ppm	112,6 %	
	Zn 100 ppm	95,9 %	Zn 100 ppm	93,9 %	
	Pb 300 ppm	102,1 %	Pb 300 ppm	102,5 %	
	Cr 300 ppm	104,6 %	Cr 300 ppm	99,2 %	
	Zn 300 ppm	99,3 %	Zn 300 ppm	102,4 %	
	REF + SAT	-	REF + SAT	-	
	Pb 100 ppm + SAT	94,3 %	Pb 100 ppm + SAT	89,3 %	
	Cr 100 ppm + SAT	88,1 %	Cr 100 ppm + SAT	89,1 %	
	Zn 100 ppm + SAT	103,0 %	Zn 100 ppm + SAT	93,7 %	
	Pb 300 ppm + SAT	95,8 %	Pb 300 ppm + SAT	100,8 %	
	Cr 300 ppm + SAT	91,6 %	Cr 300 ppm + SAT	95,6 %	
	Zn 300 ppm + SAT	97,7 %	Zn 300 ppm + SAT	99,2 %	
AN + ALV					

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

Tabela 46: pH e condutividade elétrica do líquido lixiviante após o ensaio de lixiviação (NBR 10005).

Argamassas			pH	C.E.	Argamassas			pH	C.E.
AN + RCC	REF	8,768	6,301	REF	8,688	7,362			
	Pb 100 ppm	9,030	7,419	Pb 100 ppm	8,398	6,334			
	Cr 100 ppm	8,508	6,258	Cr 100 ppm	8,091	6,019			
	Zn 100 ppm	8,922	6,456	Zn 100 ppm	8,078	6,093			
	Pb 300 ppm	8,805	6,864	Pb 300 ppm	8,021	6,276			
	Cr 300 ppm	7,981	6,289	Cr 300 ppm	8,587	6,093			
	Zn 300 ppm	8,436	6,218	Zn 300 ppm	8,622	5,947			
	REF + SAT	8,709	6,573	REF + SAT	8,597	6,893			
	Pb 100 ppm+ SAT	8,241	7,822	Pb 100 ppm+ SAT	9,014	6,347			
	Cr 100 ppm+ SAT	8,627	6,187	Cr 100 ppm+ SAT	8,376	6,262			
	Zn 100 ppm+ SAT	8,688	6,286	Zn 100 ppm+ SAT	8,177	6,265			
	Pb 300 ppm+ SAT	8,282	7,865	Pb 300 ppm+ SAT	8,325	6,197			
	Cr 300 ppm+ SAT	9,467	6,223	Cr 300 ppm+ SAT	8,423	6,260			
	Zn 300 ppm+ SAT	8,265	6,224	Zn 300 ppm+ SAT	8,146	5,882			
AN + ALV									

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco; C.E. = Condutividade elétrica (mS/cm).

5.3.2.4.3 Ensaio de solubilização

As concentrações dos elementos solubilizados durante o ensaio encontram-se na Tabela 47. Todos os metais pesados de interesse (chumbo, cromo e zinco) foram encontrados nas argamassas de referência. Bem como, foi solubilizado cálcio, ferro, cobre, estrôncio e níquel

em, todas as argamassas, oriundo do agregado e do cimento, conforme verificado no ensaio de solubilização do agregado e na análise química do aglomerante.

O elemento com maior predominância em todas as amostras, assim como no ensaio de lixiviação baseado na norma 10005, foi o cálcio. Pois, como comentando anteriormente, a liberação do cálcio foi devido à dissolução da matriz. No ensaio de solubilização, o valor obtido foi inferior ao ensaio de lixiviação (NBR 10005), uma vez que o ensaio de solubilização foi realizado com água destilada e deionizada (pH 7) e a amostra foi mantida em repouso até a finalização do ensaio.

Tabela 47: Concentrações dos elementos solubilizados das amostras, em mg/L.

Material/ Argamassas	Ca	Pb	Cr	Zn	Fe	Cu	Sr	Ni
REF	790,3	41,7	42,1	9,5	41,7	43,5	24,2	N.D.
Pb 100 ppm	745,1	29,1	N.D.	18,4	29,5	30,7	16,4	18,0
Cr 100 ppm	739,8	38,4	17,0	12,2	37,1	33,2	25,0	18,2
Zn 100 ppm	772,6	22,3	25,1	17,1	45,0	30,7	24,8	17,4
Pb 300 ppm	812,8	28,2	60,2	10,6	40,1	35,9	25,1	N.D.
Cr 300 ppm	693,4	34,5	26,1	15,4	38,2	19,2	27,1	8,8
Zn 300 ppm	685,4	36,5	37,4	15,1	41,1	40,5	23,6	20,9
AN + RCC								
REF + SAT	766,3	27,5	18,4	19,5	30,0	24,9	26,9	13,9
Pb 100+SAT	766,7	30,5	36,9	19,9	34,4	27,1	30,1	N.D.
Cr 100+SAT	934,1	24,6	21,7	14,3	41,2	32,7	32,4	14,3
Zn 100+SAT	809,5	28,0	48,2	17,9	46,6	33,5	33,5	12,7
Pb 300+SAT	714,5	35,2	44,6	19,3	37,7	27,9	22,7	N.D.
Cr 300+SAT	411,8	8,3	3,0	6,0	10,0	31,7	20,0	N.D.
Zn 300+SAT	827,2	37,9	31,3	19,6	25,8	41,6	25,5	N.D.
AN + ALV								
REF	669,9	25,7	23,5	12,5	28,5	34,8	16,5	N.D.
Pb 100 ppm	514,0	9,5	10,0	5,1	10,0	30,9	20,0	N.D.
Cr 100 ppm	525,5	10,1	2,0	6,3	10,0	31,5	20,0	N.D.
Zn 100 ppm	564,8	11,5	N.D.	4,0	20,0	32,1	20,0	N.D.
Pb 300 ppm	515,8	11,7	10,0	6,0	10,0	33,6	20,0	N.D.
Cr 300 ppm	536,6	8,6	5,0	7,5	20,0	30,9	20,0	N.D.
Zn 300 ppm	508,5	12,1	10,0	4,7	10,0	30,8	20,0	N.D.
REF + SAT	707,9	36,7	36,6	20,7	27,9	41,4	23,9	N.D.
Pb 100+SAT	572,9	11,6	10,0	5,0	10,0	30,7	20,0	N.D.
Cr 100+SAT	640,6	8,8	8,0	4,5	10,0	32,7	20,0	N.D.
Zn 100+SAT	392,8	11,8	N.D.	5,2	10,0	32,6	20,0	N.D.
Pb 300+SAT	561,5	11,4	10,0	5,5	10,0	30,5	30,0	N.D.
Cr 300+SAT	540,2	7,8	1,0	5,6	10,0	31,0	20,0	N.D.
Zn 300+SAT	629,8	12,1	N.D.	6,0	10,0	30,5	20,0	N.D.

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco; N.D. = não detectado.

Na Tabela 48 têm-se a porcentagem de retenção das argamassas em relação ao metal incorporado e, também, com relação ao teor desse metal liberado na referência. Se na argamassa com incorporação de cromo (RCC+ Cr 300 ppm), por exemplo, lixiviou 26 ppm do metal e na argamassa de referência (REF-RCC) lixiviou 42 ppm, conclui-se que 100 % do metal incorporado na amostra foi retido. Pois, foi considerado que a amostra de referência é inerte.

Tabela 48: Porcentagem de retenção dos metais de interesse pelas argamassas.

Argamassas		Retenção	Argamassas		Retenção
AN + RCC	REF	-	REF	-	
	Pb 100 ppm	112,7 %	Pb 100 ppm	116,2 %	
	Cr 100 ppm	125,1 %	Cr 100 ppm	121,5 %	
	Zn 100 ppm	92,4 %	Zn 100 ppm	108,5 %	
	Pb 300 ppm	104,5 %	Pb 300 ppm	104,7 %	
	Cr 300 ppm	105,3 %	Cr 300 ppm	106,2 %	
	Zn 300 ppm	98,1 %	Zn 300 ppm	102,6 %	
	REF + SAT	-	REF + SAT	-	
	Pb 100 ppm + SAT	97,0 %	Pb 100 ppm + SAT	125,1 %	
	Cr 100 ppm + SAT	96,6 %	Cr 100 ppm + SAT	128,6 %	
	Zn 100 ppm + SAT	101,6 %	Zn 100 ppm + SAT	115,5 %	
Pb 300 ppm + SAT	97,4 %	Pb 300 ppm + SAT	108,4 %		
Cr 300 ppm + SAT	105,1 %	Cr 300 ppm + SAT	111,9 %		
Zn 300 ppm + SAT	99,9 %	Zn 300 ppm + SAT	104,9 %		
AN + ALV					

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco.

Em relação às amostras com agregado leve, nenhuma amostra lixiviou teor superior ao presente na amostra de referência, concluindo que 100 % do metal pesado de interesse foi retido no interior das amostras. Já, nas argamassas produzidas com o agregado reciclado, as amostras sem saturação prévia do agregado apresentaram maior retenção, com liberação superior a referência apenas das argamassas com zinco nos dois teores. Porém, em relação à incorporação de zinco, quando saturado previamente o agregado com o metal, a retenção subiu para 100 %, o oposto do que ocorreu nas argamassas com incorporação de cromo e chumbo (exceção da amostra RCC+ Cr 300 ppm+ SAT). Contudo, a retenção desses metais foi superior a 96,6 % (Tabela 48). Essa elevada retenção pode ser explicada pela ligação do metal pesado com os produtos hidratados do cimento (conforme verificado no ensaio de DRX), por retenção nos agregados (verificado no ensaio de sorção do grão), pelo efeito de tamponamento, pela baixa permeabilidade, porosidade e diâ-

metro médio dos poros das argamassas (determinado nos ensaios específicos). Corroborando com os resultados de Engelsen *et al.* (2010).

Na Tabela 49 estão relacionados os resultados de pH e condutividade elétrica das argamassas. Os valores de pH de todas as amostras variaram pouco, ficando entre 13,9 e 14,2, apresentando caráter básico. A condutividade elétrica das amostras variou de 4,3 a 6,8 mS/cm². A condutividade elétrica baseia-se na condução de eletricidade causada pela movimentação independente dos íons em solução. A condutividade aponta para o nível de solubilidade de sais ou outros compostos em ambiente aquático, ou seja, quanto maior o teor de íons no líquido lixiviado, maior será a condutividade elétrica.

Tabela 49: pH e condutividade elétrica do líquido lixiviante após o ensaio de solubilização.

Argamassas		pH	C.E.	Argamassas		pH	C.E.
AN + RCC	REF	14,144	5,503	REF	14,124	5,803	
	Pb 100 ppm	14,110	6,204	Pb 100 ppm	14,015	5,051	
	Cr 100 ppm	14,125	5,963	Cr 100 ppm	14,040	5,740	
	Zn 100 ppm	14,133	6,311	Zn 100 ppm	13,993	4,384	
	Pb 300 ppm	14,176	6,567	Pb 300 ppm	14,153	5,613	
	Cr 300 ppm	14,064	5,611	Cr 300 ppm	14,101	6,094	
	Zn 300 ppm	14,069	5,715	Zn 300 ppm	13,934	4,931	
	REF + SAT	14,077	5,961	REF + SAT	14,011	5,483	
	Pb 100 ppm+ SAT	14,080	6,106	Pb 100 ppm+ SAT	13,866	4,322	
	Cr 100 ppm+ SAT	14,151	6,530	Cr 100 ppm+ SAT	14,051	5,390	
Zn 100 ppm+ SAT	14,229	6,102	Zn 100 ppm+ SAT	14,109	5,583		
Pb 300 ppm+ SAT	13,933	4,571	Pb 300 ppm+ SAT	14,187	6,820		
Cr 300 ppm+ SAT	13,972	4,970	Cr 300 ppm+ SAT	14,063	6,327		
Zn 300 ppm+ SAT	14,137	5,987	Zn 300 ppm+ SAT	14,212	5,522		
AN + ALV							

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco; C.E. = Condutividade elétrica (mS/cm).

Comparando os resultados do pH e condutividade elétrica do ensaio de lixiviação (NBR 10005) e do ensaio de solubilização (Tabela 46 e Tabela 49), percebe-se que o pH de todas as amostras do ensaio de solubilização foram superiores. Todavia, nos dois ensaios, o pH de todas as amostras foram alcalinos, mesmo com a solução de extração ácida utilizada no ensaio de lixiviação (NBR 10005). O oposto ocorreu em relação à condutividade elétrica, uma vez que no ensaio de solubilização reduziu o valor de condutividade elétrica das amostras. Isso ocorreu, pois, como a solução de extração do ensaio de lixiviação (NBR 10005) é ácida, auxiliou para maior liberação dos elementos químicos presente nas amostras, aumentando a quantidade de íons no líquido lixiviado.

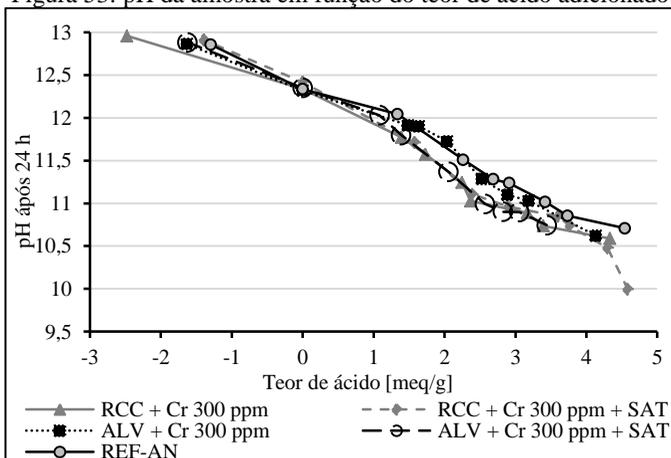
5.3.2.4.4 Ensaio de dependência do pH

O ensaio de dependência do pH foi realizado nas amostras com 300 ppm de cromo hexavalente: RCC+ Cr 300 ppm, RCC+ Cr 300 ppm+ SAT, ALV+ Cr 300 ppm, ALV+ Cr 300 ppm+ SAT; e na amostra de referência: REF-AN, com 28 dias de hidratação.

Na Figura 53 têm-se o gráfico do pH após 24 horas do contato da amostra com o líquido lixiviante em função do teor de ácido adicionado (definido com base nos 9 valores de pH iniciais necessários para a realização do ensaio, conforme descrito na metodologia). Os valores negativos do teor de ácido são referentes ao teor de base (KOH) adicionado no líquido lixiviante.

O valor do pH aumentou (todos acima de 10) em relação ao pH inicial (que variou de 13 a 2), em menos de 24 horas, devido à hidratação de óxidos básicos (CaO , Al_2O_3 e Fe_2O_3) do cimento. Corroborando com Lu *et al.* (2016). Com o aumento do teor de ácido na amostra, menor foi o pH após as 24 horas. O pH natural (pH com apenas água destilada e deionizada) de todas as amostras ficaram em torno de 12,3 e o teor de ácido adicionado para o ajuste do pH desejado foi semelhante em todas as argamassas.

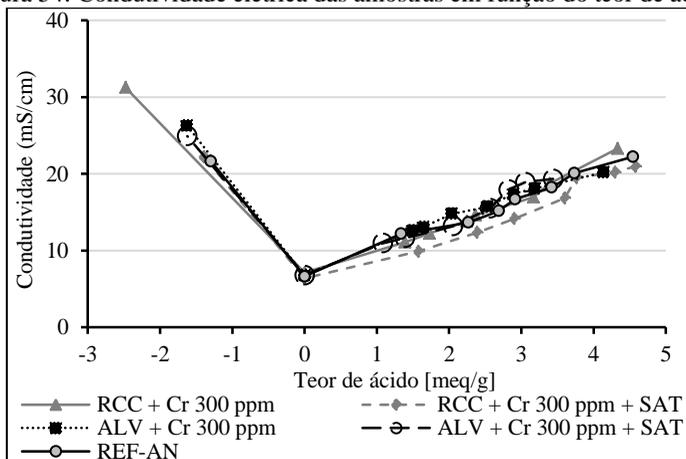
Figura 53: pH da amostra em função do teor de ácido adicionado.



Na Figura 54 são apresentados os resultados de condutividade elétrica das amostras após 24 horas em contato com o líquido lixiviante em função do teor de ácido. Com o aumento do teor de ácido, maior foi a condutividade das amostras, sendo que nos extremos (máximo de áci-

do e máximo de base) têm-se os maiores valores de condutividade elétrica, referente à maior quantidade de íons em movimento na solução (maior lixiviação).

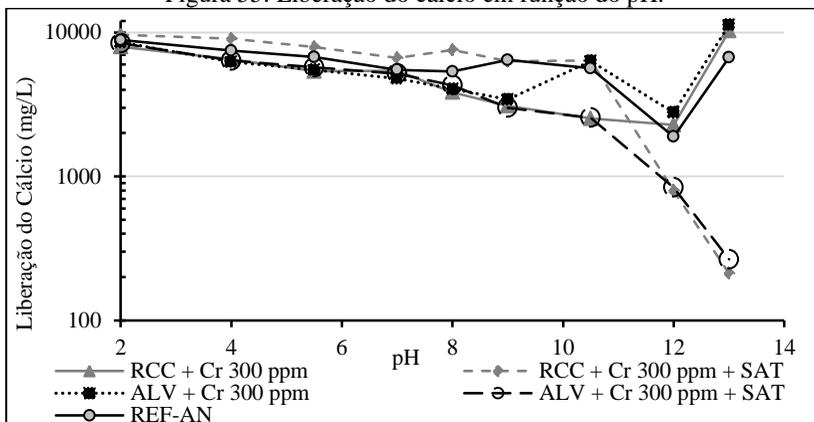
Figura 54: Condutividade elétrica das amostras em função do teor de ácido.



Na Figura 55 a Figura 57 são apresentados os resultados da liberação dos metais pesados (em escala logarítmica) em função do pH da solução. Em todas as amostras, não houve liberação acima do limite detectável do equipamento de ferro, titânio, vanádio, manganês, cobre, níquel, molibdênio e bário. A lixiviação ocorreu quando os constituintes químicos no fluido de poros da matriz estiverem na forma iônica. A quantidade de dissolução depende da solubilidade do constituinte e da composição química da água dos poros, em particular o seu pH. Sob condições de lixiviação em pH neutro, a taxa de lixiviação é controlada pela difusão molecular das espécies solúveis. Contudo, em condições ácidas, a taxa será também controlada pela taxa de penetração de íons de hidrogênio na matriz solidificada, uma vez que esta estabelece a especiação e a solubilidade dos poluentes presentes (EPA, 1998).

O ácido ataca a pasta pozolânica baseada na permeação da estrutura dos poros e na dissolução iônica. O ácido consome a maior parte do hidróxido de cálcio na camada lixiviada e deixa uma estrutura altamente porosa (EPA, 1998).

Figura 55: Liberação do cálcio em função do pH.



A maior liberação de cálcio ocorreu nas extremidades (maior teor de cálcio e base, aproximadamente pH 2 e 13, respectivamente), com exceção das amostras com saturação prévia (RCC+ Cr 300 ppm +SAT e ALV+ Cr 300 ppm +SAT) nas quais, com pH em torno de 13, ocorreu a menor liberação de cálcio. A liberação de cálcio é apresentada em uma escala superior aos demais elementos, porque a sua liberação é muito superior, uma vez que o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é um composto solúvel em meio aquoso e em contato com a água pura é facilmente lixiviado, pela dissolução da matriz (Figura 55).

A taxa de dissolução depende da diferença entre as concentrações reais e de equilíbrio dos constituintes do cimento. Quando a camada superficial do cimento não está em equilíbrio termodinâmico, a cinética de sua dissolução determina a degradação, que é maior se a camada superficial é mais solúvel e a água em contato ocupa espécies iônicas da solução intersticial de poros da pasta de cimento. Como a solubilidade do cálcio é geralmente mais elevada, a sua dissolução resulta no enriquecimento da pasta com ferro trivalente. A sua incorporação na camada superficial de gel C-S-H reduz a solubilidade do cálcio. A camada superficial atinge então o equilíbrio termodinâmico e não se dissolve. Nesse caso, a liberação de metais pesados a partir de materiais cimentícios pode ser descrita como uma difusão efetiva através da matriz de cimento (OJOVAN e LEE, 2014).

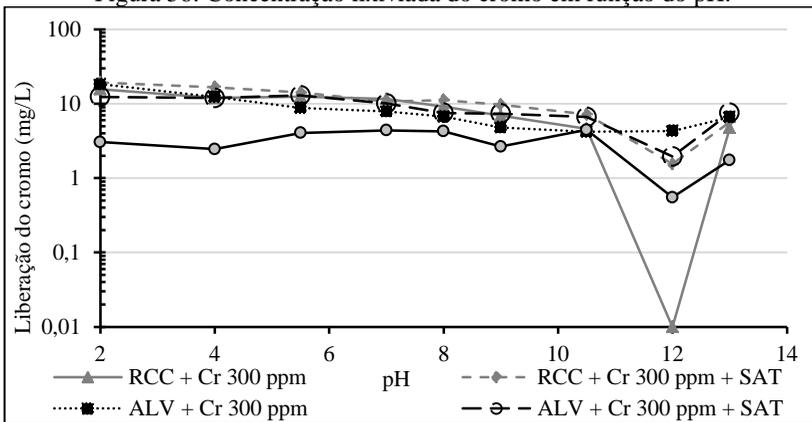
A maior solubilização e dissolução de cromo ocorreram na solução com maior teor de ácido (pH inicial próximo a 2). A menor liberação de cromo ocorreu com o pH natural das amostras (Figura 56). Por ser um elemento anfotérico, o cromo deveria apresentar um aumento da

solubilidade em pH elevado ou muito baixo, e como isto não foi observado, é um indicativo que o cromo foi adsorvido ou retido na estrutura dos produtos de hidratação do cimento, corroborando com os resultados de DRX e demais ensaios de compatibilidade ambiental.

A liberação de cromo de todas as amostras com incorporação de 300 ppm de cromo hexavalente permaneceram abaixo de 20 ppm (sendo a maior liberação encontrada no pH em torno de 2), ou seja, todas as amostras apresentaram retenção do cromo superior a 93 %.

O Cr^{6+} é adsorvido pelo concreto. Um parâmetro importante na eficiência de adsorção é o pH. Abaixo de 3,5 a remoção de Cr^{6+} é controlada por uma reação de redução com uma variação de adsorção de 0,1-0,8 mg/g. Entre pH 4-6 há uma maior adsorção entre 0,4-1,4 mg/g e em pH alcalino o grau de adsorção de Cr^{6+} diminui devido a um enfraquecimento da formação do complexo superficial (WANG *et al.*, 2015).

Figura 56: Concentração lixiviada do cromo em função do pH.

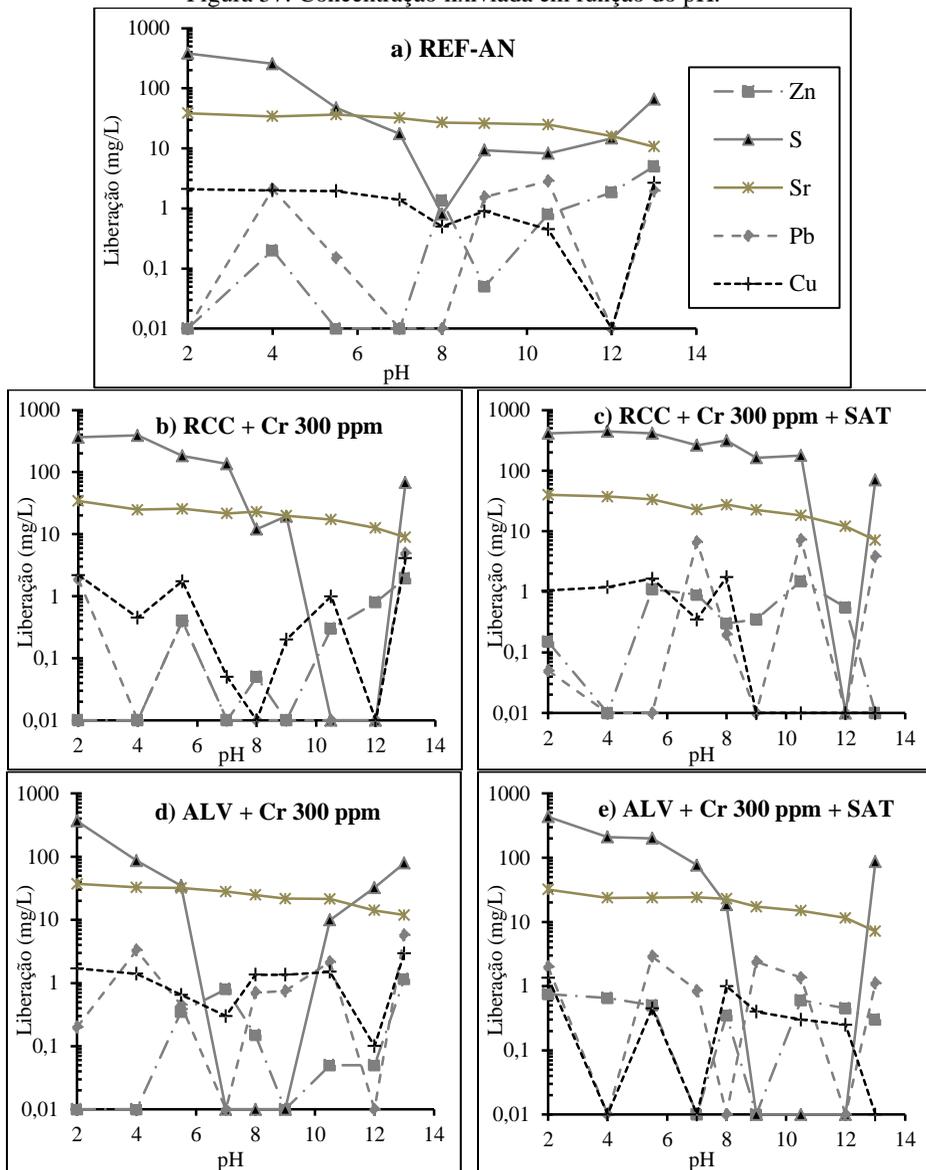


Elevados índices de solubilização são considerados quando o pH ainda é ácido, pois os metais presentes nos resíduos tendem a se solubilizar quando são liberados da fração sólida aumentando a sua concentração e conferindo mais perigo ao meio, em função da lixiviação dos micro-organismos e da acidez. Somente com o aumento do pH, a concentração de metais tende a diminuir devido à precipitação que ocorre no meio por causa do tamponamento e da formação de hidróxidos, tornando os metais menos solúveis e menos perigosos (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Na Figura 57 nota-se que a maior solubilização e dissolução de cromo, enxofre e estrôncio ocorreram na solução com maior teor de

ácido (pH inicial próximo a 2). Enquanto, o zinco, o chumbo e o cobre a liberação variou em função do pH, devido à curva de solubilidade de cada metal.

Figura 57: Concentração lixiviada em função do pH.



5.3.2.5 Estudo da microestrutura

5.3.2.5.1 Microscopia eletrônica de varredura

Nas Figura 58 e Figura 59 são apresentadas as micrografias da superfície das amostras aos 3 e 28 dias de hidratação. Verificou-se a presença de silicato de cálcio hidratado amorfo, placas de hidróxido de cálcio e formas semelhantes a agulhas de etringita. A morfologia do C-S-H varia de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino. A portlandita (C-H) tende a formar cristais, sob a forma de prismas hexagonais e a etringita forma cristais em formato de agulhas. A presença de vazios nas amostras pode ocorrer devido a espaços vazios não preenchidos pelos compostos sólidos da pasta, com formato irregular e/ou devido ao ar incorporado aprisionado durante a mistura, com formato esférico (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Nas argamassas com agregado leve, houve densificação da zona de transição interfacial (menor porosidade e maior número de fases hidratadas), a qual não é possível fazer uma distinção entre a ZTI e a matriz de cimento. A eficiência da liberação da água do interior dos agregados porosos para a matriz de cimento depende da força de sucção que, por sua vez, depende da porosidade e da umidade relativa da pasta de cimento. Nota-se a presença de poros pequenos na pasta de cimento, bem como na argamassa com agregado leve, há a redução do tamanho dos poros do agregado para a pasta de cimento. Essa diferença do tamanho dos poros auxiliou para a liberação da água do agregado poroso, uma vez que quanto menor o diâmetro do poro, maior deverá ser a força de sucção para que a água seja liberada dos poros do agregado poroso. Assim, os poros pequenos (menores que 4 nm de diâmetro) permanecem durante um maior período cheios de água e no seu estado saturado podem ficar cheios com produtos de hidratação que, com a posterior liberação da água, permanecem com os produtos de hidratação (BENTZ e STUTZMAN, 2008).

A melhora da ZTI, entre o agregado leve e a matriz da pasta de cimento, se deve à melhor hidratação do cimento, devido à cura interna pela água absorvida no agregado leve, a qual reduz a continuidade dos poros capilares e aumenta a tortuosidade dos poros na pasta de cimento (HE *et al.*, 2014). Para Rossignolo (2009) a zona de transição dos concretos com argila expandida apresentam espessura, porosidade e teor de hidróxido de cálcio menores se comparados aos concretos com agregados convencionais devido à absorção de água dos agregados leves e à redução da relação água/cimento da pasta.

Nas argamassas com agregado reciclado, devido à sua aparência similar ao restante da pasta de cimento e por não ser um agregado muito poroso superficialmente, como é o caso do agregado leve, não foi possível identificar a ZTI. Assim, pode-se concluir que os grãos de cimento foram depositados nos poros e na superfície do agregado, iniciando sua hidratação a com deposição dos produtos hidratados ao redor do grão, favorecidos pela água absorvida do agregado, eliminando a ZTI fraca/porosa.

As amostras com agregado poroso (leve ou reciclado) apresentaram uma estrutura densa e com muitos produtos hidratados, o que contribuiu para a resistência mecânica comparável à REF-AN.

A densificação da ZTI serviu como uma barreira eficaz para a redução da lixiviação dos contaminantes, bem como melhorando as propriedades físicas das argamassas.

Nas amostras com agregado reciclado e zinco (RCC+ Zn 300 ppm e RCC+ Zn 300 ppm+ SAT) houve uma redução da etringita quando comparada com as outras amostras, principalmente na amostra RCC+ Zn 300 ppm. Isso pode ser explicado pela reação química entre o sal de nitrato de zinco com o C₃A, favorecendo a precipitação do composto Ca₃Al₄ZnO₁₀ (verificado por DRX).

As argamassas com incorporação de 300 ppm de zinco (RCC+ Zn 300 ppm e ALV+ Zn 300 ppm) resultaram na presença de precipitados de complexos de zinco ao redor dos grãos anidros, corroborando com Gineys, Aouad e Damidot (2011).

Nas amostras com agregado leve (ALV+ Pb 300 ppm+ SAT e ALV+ Zn 300 ppm+ SAT) percebe-se a formação de C-S-H dentro dos poros do agregado leve, a formação desta fase é favorecida pela quantidade crescente de água na zona de transição interfacial e a possibilidade de partículas de cimento serem depositadas nos poros do agregado leve. Adicionalmente, pode ocorrer uma reação pozolânica entre o agregado e os produtos de hidratação do cimento, devido a altos teores de sílica do agregado, conforme verificado no ensaio de RMN. Corroborando com Vargas *et al.* (2017).

Não foi possível identificar a presença de chumbo nas amostras. Porém, para Gineys, Aouad e Damidot (2010) o Pb é fixado, principalmente ao redor dos grãos de cimento anidro. Estando, concentrado, principalmente no C-S-H.

Nas argamassas com incorporação de cromo hexavalente houve redução da quantidade de produtos hidratados (C-S-H e Ca(OH)₂) em relação às amostras referência, corroborando com Sinyoung *et al.* (2011). Pois o cromo reagiu com o C₃S e o C₂S formando nossos

compostos, conforme observado e analisado no ensaio de DRX (item 5.3.2.5.3).

Nas amostras com cromo, tem-se a presença de produtos de hidratação com a mesma morfologia encontrada por Sinyoung *et al.* (2011), na qual por EDX os autores verificaram que os produtos majoritários eram silício, cálcio, oxigênio e cromo, possivelmente é a fase $\text{CaCrSi}_4\text{O}_{10}$ encontrada na análise de DRX (item 5.3.2.5.3).

Figura 58: Imagens de MEV das amostras com RCC com 3 e 28 dias (CONTINUA).

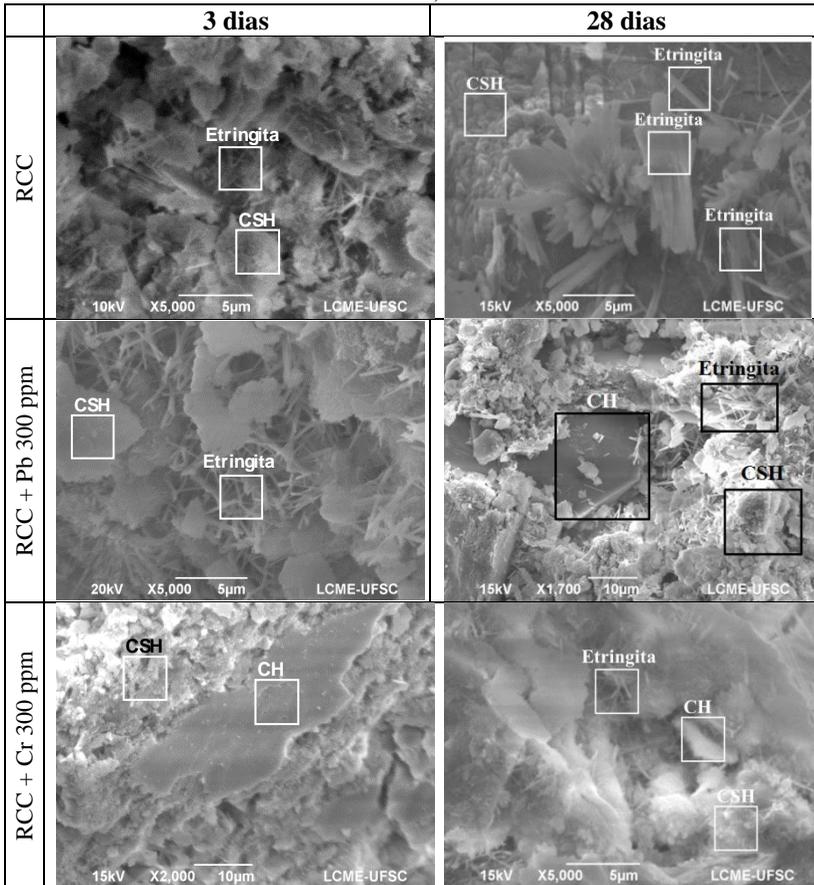
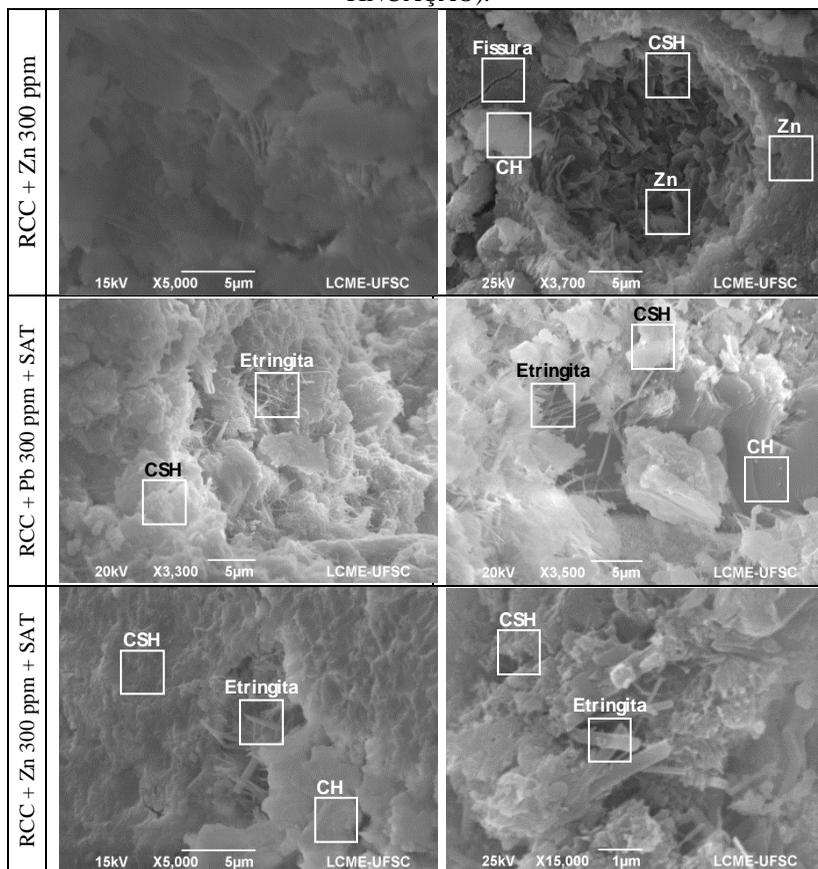


Figura 58: Imagens de MEV das amostras com RCC com 3 e 28 dias (CONTINUAÇÃO).



Nota: Foi realizado EDX nos pontos em evidência para identificação das fases.

Figura 59: Imagens de MEV das argamassas com ALV com 3 e 28 dias (CONTINUA).

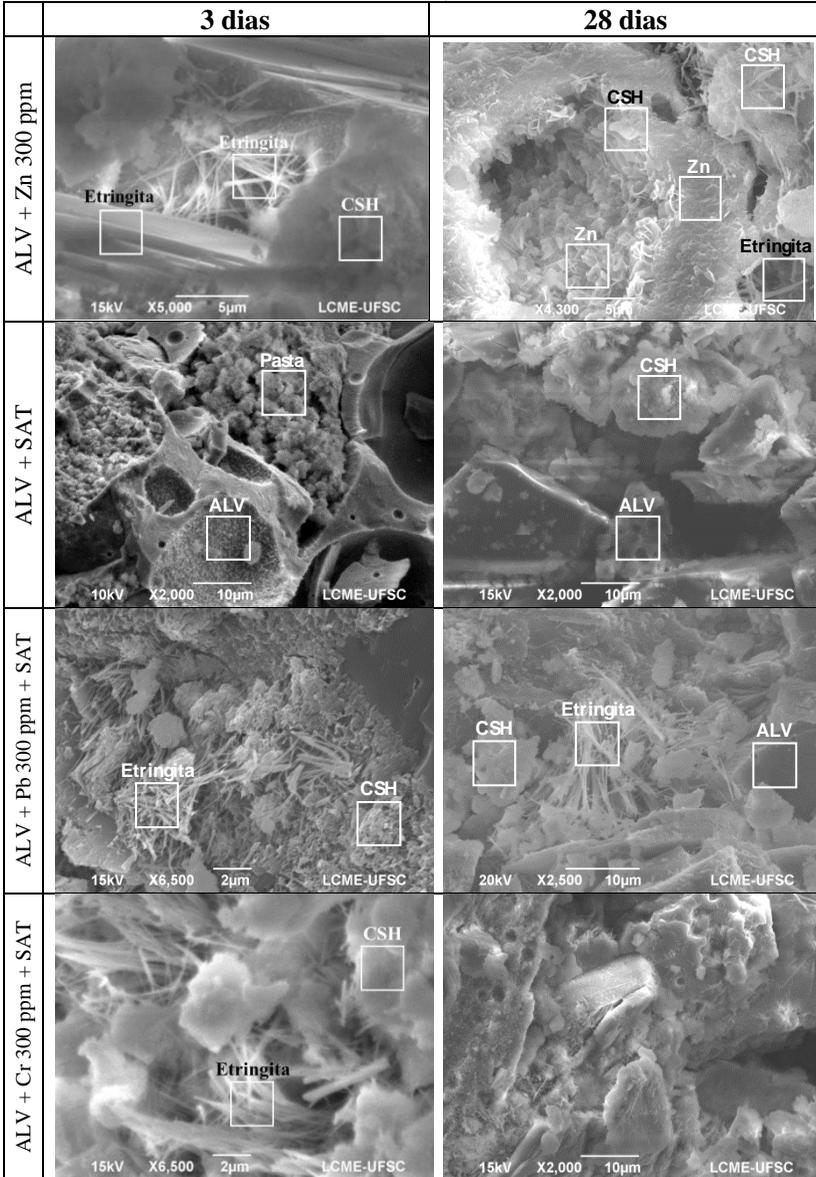
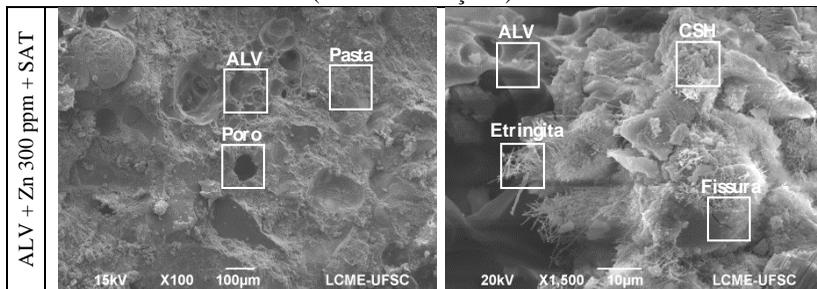


Figura 59: Imagens de MEV das argamassas com ALV com 3 e 28 dias (CONTINUAÇÃO).



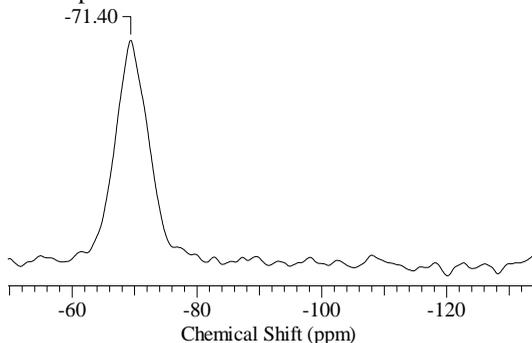
Nota: Foi realizado EDX nos pontos em evidência para identificação das fases.

5.3.2.5.2 Ressonância magnética nuclear

As amostras de referência ensaiadas foram: REF-RCC, RCC+SAT, REF-ALV e ALV+SAT, todas com 28 dias de hidratação; já as demais amostras foram ensaiadas com 300 ppm do metal em questão: RCC+ Zn 300 ppm, RCC+ Zn 300 ppm+ SAT, RCC+ Cr 300 ppm, RCC+ Cr 300 ppm+ SAT, ALV+ Cr 300 ppm e ALV+ Cr 300 ppm+ SAT, todos com 28 dias de hidratação; e com 3 dias de hidratação foram estudadas as amostras RCC+ Cr 300 ppm, RCC+ Cr 300 ppm+ SAT, ALV+ Cr 300 ppm e ALV+ Cr 300 ppm+ SAT.

Os espectros de RMN indicam o grau de polimerização dos hidratos da pasta de cimento, ou seja, a polimerização corresponde ao endurecimento e à cura da pasta. O grau de polimerização é indicado pelo deslocamento químico. Na Figura 60 tem-se o espectro do cimento anidro utilizado no estudo. O único pico encontrado foi o pico Q^0 , que indica a presença de unidades monoméricas correspondentes aos silicatos cálcicos anidros (C_2S e C_3S) ou a presença de componentes do cimento anidro (BROUGH *et al.*, 1994; LIN, CHEN e LIN, 1997; JIMÉNEZ e PALOMO, 2010; LI *et al.*, 2014).

Figura 60: Espectros de ^{29}Si CP-MASS/RMN do cimento anidro.



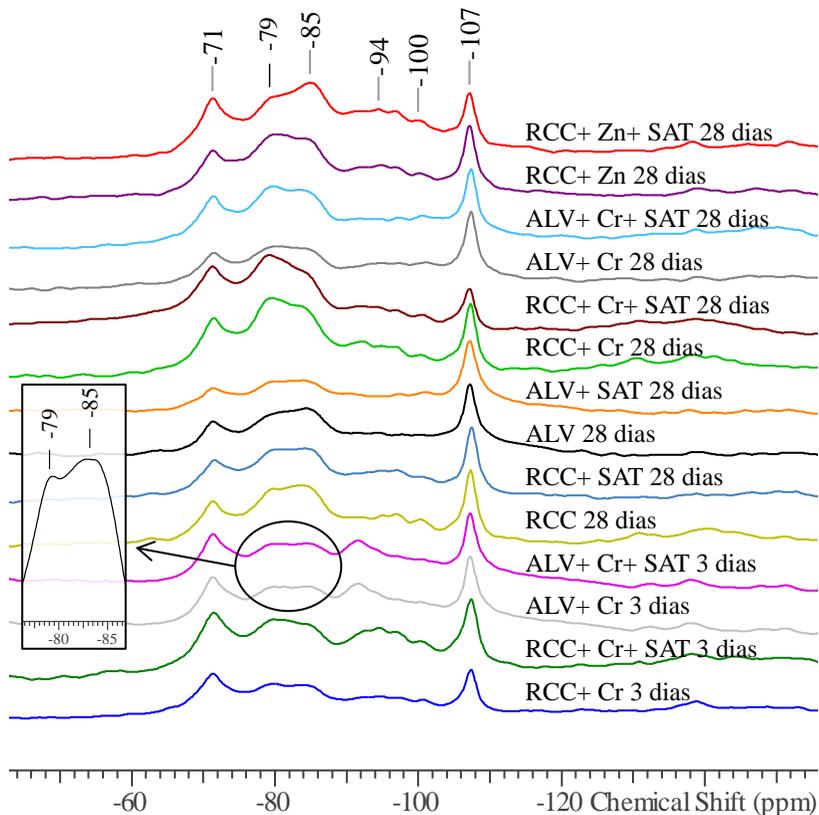
Na Figura 61 são apresentados os espectros de ^{29}Si RMN/ MAS das argamassas estudadas com 3 e 28 dias de hidratação. Verificou-se a presença dos picos Q^1 a Q^4 , além da presença do pico Q^0 em menor intensidade que do cimento anidro. Os picos em Q^1 e Q^2 correspondem à hidratação dos silicatos cálcios e a formação do C-S-H, e a presença dos picos em Q^3 e Q^4 indica a polimerização do C-S-H, quartzo cristalino e minerais de silicatos pouco ordenados, sendo que os picos em -100 ppm (Q^3) e -107 ppm (Q^4) são comuns para todos os espectros (LI *et al.*, 2014).

Nas argamassas de referência (REF-RCC, RCC+SAT, REF-ALV e ALV+SAT) com 28 dias de hidratação, obteve-se a presença do pico -83 ppm (Q^1) e -96 ppm (Q^4) referentes ao cimento hidratado e o gel de C-S-H (ZANNI *et al.*, 1996; BLANCO-VARELA *et al.*, 2008). Já, em todas as argamassas com incorporação de 300 ppm de cromo e 300 ppm de zinco, foram registrados o pico Q^1 , em média em -79,9 ppm, e o pico Q^2 em -84,9 ppm, referentes à presença do metal pesado nas amostras (LIN, CHEN e LIN, 1997; LI *et al.*, 2014). Em todas as amostras com incorporação de metais pesados obteve-se a presença dos picos em -92 ppm (Q^2) e/ou em -94 ppm (Q^3), referentes à presença do gel de C-S-H (BLANCO-VARELA *et al.*, 2008).

Observa-se, no detalhe da Figura 61, que nas argamassas com agregado leve e incorporação de 300 ppm de cromo (ALV+ Cr e ALV+ Cr+ SAT) aos 3 dias de hidratação, que o pico Q^2 ultrapassou o pico Q^1 em intensidade, se dividindo em um pico principal em torno de -85 ppm e um pico secundário em aproximadamente -80 ppm, sendo este pico secundário chamado de Q^{2L} . Esta divisão sugere a existência de dois locais de média cadeia distinguíveis nas cadeias de silicato de cálcio dentro do gel de C-S-H, corroborando com Brough *et al.* (1994). De

acordo com Komarneni e Roy (1987) o espectro da jenita apresenta essa divisão no pico. Sendo que, o C-S-H tipo II é descrito como jenita (TAYLOR, 1997). Estando de acordo com o a análise de DRX, na qual foi encontrada essa fase.

Figura 61: Espectros de ^{29}Si CP-MASS/RMN das argamassas.



O sinal em -80 ppm (Q^1), na argamassa com agregado reciclado e 300 ppm de zinco (RCC+ Zn 300 ppm), indica a presença de pares de tetraedros de silicatos ligados (dissilicatos) e o sinal a -85 ppm presentes nas amostras REF-RCC, RCC+SAT, REF-ALV, ALV+SAT e RCC+ Zn 300 ppm+ SAT corresponde à presença de silicatos de meia cadeia (Q^2). Portanto, as principais estruturas de C-S-H, formadas nessas amostras, são dissilicatos e cadeias curtas (LIPPMAA *et al.*, 1982; CONG e KIRKPATRICK, 1993 e 1996).

Em todas as amostras, houve a presença de um sinal em Q^4 (em intensidades diferentes em cada amostra, sendo mais expressivo nas amostras com agregado leve), referente à estrutura tridimensional, com quartzo cristalino e sílica amorfa, mostrando a prevalência da polimerização do C-S-H. A presença dos picos Q^3 (em média, -94,6 ppm, -97,1 ppm e -100,5 ppm), corresponde à ramificação de cadeia e em todas as amostras é pequena (CONG e KIRKPATRICK, 1996).

Na Tabela 50 são apresentados os dados da intensidade da integral, o grau de hidratação de cada amostra e o comprimento médio dos ânions, calculado pelo grau de polimerização do tetraedro (SiO_4). A integral em cada pico é, na maioria dos casos, diretamente proporcional ao número de átomos com o mesmo tipo químico circundante (ENGE-LHARDT, 1989; JUSTNES *et al.*, 1990). Sendo que, nas amostras estudadas, as maiores intensidades da integral foram para os picos Q^1 e Q^2 .

O menor pico a -71 ppm, observado na Figura 61, foi encontrado nas argamassas de referência com agregado leve, com e sem molhagem prévia. Isto é, essa é a argamassa que apresentou maior teor de hidratação, pois apresentou a menor presença de cimento anidro, estando coerente com o resultado da análise da intensidade da integral dos picos Q^0 , conforme exposto na Tabela 50.

A diferença nos espectros das argamassas, com 3 e com 28 dias de hidratação, são consequência do progresso da hidratação. Com o aumento do período de hidratação, reduziu a intensidade do pico Q^0 (referente à C_2S e C_3S) e aumentou a intensidade dos picos Q^1 e Q^2 (referente à fase C-S-H), confirmando o avanço do processo de hidratação e conduzindo a conclusão que, predominantemente, grupos de dissilicatos são formados, corroborando com os trabalhos de Parry-Jones *et al.* (1989), Izquierdo *et al.* (2013) e Sáez del Bosque *et al.* (2013).

Nas argamassas com agregado reciclado e cromo (RCC+ Cr 300 ppm e RCC+ Cr 300 ppm+ SAT), com 3 dias de hidratação, não houve a presença de silicatos de meia cadeia, pois o desenvolvimento de Q^2 ocorre em uma fase posterior da hidratação e no envelhecimento do gel de C-S-H (BROUGH *et al.*, 1994). Bem como, nas argamassas com agregado leve (ALV+ Cr 300 ppm e ALV+ Cr 300 ppm+ SAT), também com 3 dias, verificou-se a ausência do pico Q^3 , referente a minerais de silicatos pouco ordenados, ou seja nessas argamassas estão sendo formadas, principalmente, fases semi-cristalinas, como cadeias longas de géis de C-S-H, pelo maior comprimento médio de cadeia (MCL) e pela relação Ca/Si, a que se refere à polimerização do gel de C-S-H. Já, nas argamassas de referência (REF-RCC, RCC+SAT, REF-ALV e ALV+SAT) e na argamassa RCC+ Zn 300 ppm+ SAT, com 28 dias de

hidratação, não verificou-se o grupo terminal de cadeia e os dissilicatos (Q^1).

Tabela 50: Resultado da análise de RMN.

Material	Intensidade da integral de Q^n , ^{29}Si RMN						α (%)	MCL	Ca/Si
	$I(Q^0)$	$I(Q^1)$	$I(Q^2)$	$I(Q^3)$	$I(Q^4)$	$I^0(Q^0)$			
3 dias de hidratação									
RCC+ Cr	1,00	1,38	-	0,80	0,58	3,76	73,4	2,0	-
	26,6%	36,8%	0,0%	21,4%	15,3%	100%			
RCC+ Cr+ SAT	1,00	1,55	-	1,36	0,81	4,72	78,8	2,0	-
	21,2%	32,9%	0,0%	28,7%	17,2%	100%			
ALV+ Cr	1,00	1,31	1,28	-	0,51	4,10	75,6	3,9	1,03
	24,4%	32,0%	31,2%	0,0%	17,3%	100%			
ALV+ Cr+ SAT	1,00	1,46	1,47	-	0,99	4,92	79,7	4,0	0,99
	20,3%	29,7%	29,9%	0,0%	20,1%	100%			
28 dias de hidratação									
REF-RCC	1,00	-	3,39	1,00	1,03	6,41	84,4	-	-
	15,6%	0,0%	52,8%	15,6%	16,0%	100%			
RCC+SAT	1,00	-	2,61	1,46	1,08	6,16	83,8	-	-
	16,2%	0,0%	42,4%	23,7%	17,6%	100%			
REF-ALV	1,00	-	2,80	1,33	2,04	7,18	86,1	-	-
	13,9%	0,0%	39,0%	18,6%	28,5%	100%			
ALV+SAT	1,00	-	2,73	0,88	2,10	6,72	85,1	-	-
	14,9%	0,0%	40,7%	13,1%	31,3%	100%			
RCC+ Cr	1,00	2,88	0,44	0,59	0,71	5,62	82,2	2,3	6,61
	17,8%	51,3%	7,8%	10,5%	12,6%	100%			
RCC+ Cr+ SAT	1,00	1,95	0,36	1,08	0,95	5,33	81,3	2,4	5,48
	18,7%	36,5%	6,7%	20,2%	17,9%	100%			
ALV+ Cr	1,00	2,72	0,29	1,77	1,74	7,23	86,2	2,0	9,37
	13,8%	37,6%	7,4%	24,5%	24,0%	100%			
ALV+ Cr+ SAT	1,00	2,73	0,65	0,78	1,28	6,44	84,5	2,5	4,17
	15,5%	42,3%	10,2%	12,1%	19,8%	100%			
RCC+ Zn	1,00	2,90	-	1,38	1,12	6,40	84,4	2,0	-
	15,6%	45,3%	0,0%	21,6%	17,4%	100%			
RCC+ Zn+ SAT	1,00	-	2,53	1,73	0,76	6,02	83,4	-	-
	16,6%	0,0%	42,1%	28,7%	12,6%	100%			

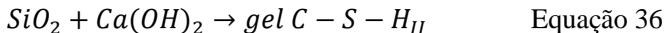
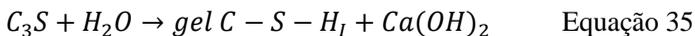
Nota: REF = referência; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; Pb = chumbo; Cr = cromo; Zn = zinco; α = grau de hidratação do clínquer de cimento; MCL = comprimento médio da cadeia.

O comprimento médio da cadeia aumentou com a evolução da hidratação (de 3 para 28 dias) para as argamassas com agregado reciclado (RCC+ Cr 300 ppm e RCC+ Cr 300 ppm+ SAT). Isto quer dizer que, com o aumento da hidratação, foram formados géis de C-S-H mais polimerizados linearmente (maior MCL), devido às baixas relações Q^2/Q^1

dos géis em idades iniciais. Enquanto que, em idades tardias, houve a formação de géis de C-S-H com MCL superiores devido à maior formação de unidades Q^2 (BROUGH *et al.*, 1994; SÁEZ DEL BOSQUE *et al.*, 2013).

Já, para as argamassas com agregado leve, o MCL diminuiu com o tempo, produzindo géis iniciais (3 dias) com altas relações Q^2/Q^1 , corroborando com Sáez del Bosque *et al.* (2013). Devido à ocorrência de duas reações de formação do gel de C-S-H simultaneamente (BROUGH *et al.*, 1994; SÁEZ DEL BOSQUE *et al.*, 2013).

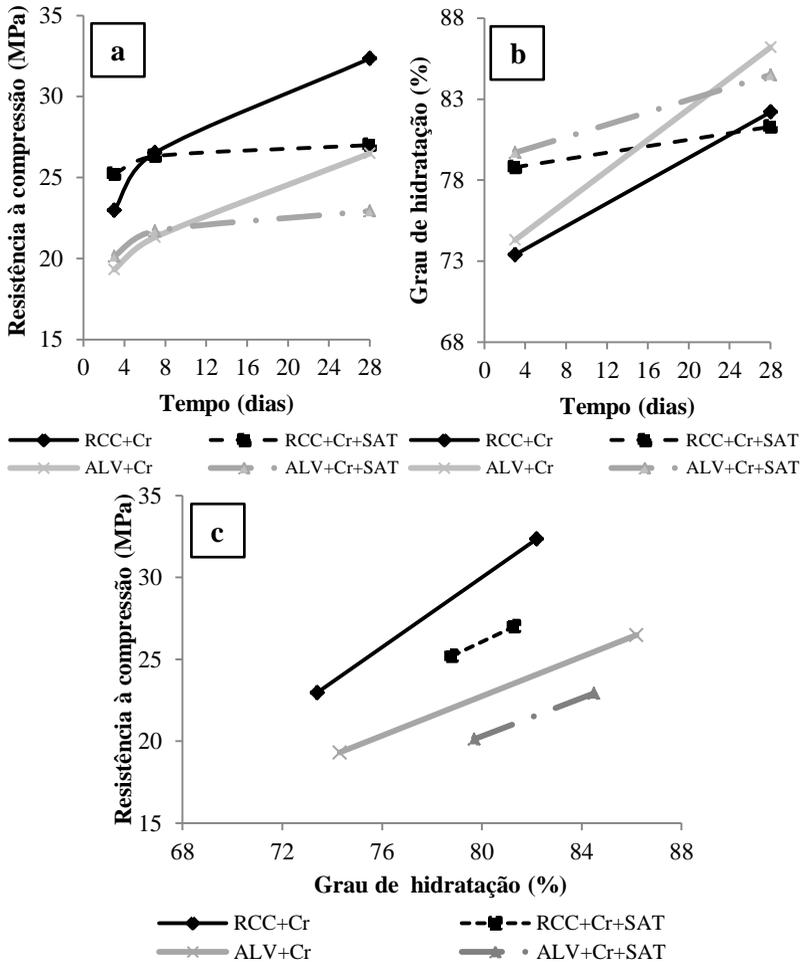
Em um primeiro momento, se formam principalmente os dissilicatos (Q^1) (Equação 35), em seguida se formam cadeias mais compridas de gel de C-S-H pela polimerização (condensação) de dissilicatos com monossilicatos, que explica o aumento do MCL com o período de hidratação das argamassas com agregado reciclado (RCC+ Cr 300 ppm e RCC+ Cr 300 ppm+ SAT). Já, na Equação 36 o gel de C-S-H_{II} gera géis iniciais ricos em Q^2 e com menor incidência de Q^1 , que justificaria o ocorrido com as argamassas de agregado leve.



A formação dos dois tipos de C-S-H pode ocorrer nas argamassas com agregado leve, uma vez que o agregado leve é rico em SiO_2 (67,9 % da composição), além de ser comprovado pelo maior pico Q^4 das argamassas com agregado leve (em todos os casos), pois esse pico refere-se, também, à presença de quartzo cristalino e sílica amorfa (LI *et al.*, 2014). Bem como, a presença do C-S-H tipo II nessas argamassas é confirmado pelo espectro (detalhe da Figura 61), conforme descrito anteriormente.

Na Figura 62 são apresentados os resultados de resistência mecânica e o grau de hidratação das argamassas com 3 e 28 dias, produzidas com agregado reciclado e agregado leve (RCC+ Cr 300 ppm, RCC+ Cr300 ppm+ SAT, ALV+ Cr 300 ppm e ALV+ Cr 300 ppm+ SAT). Nota-se, na Figura 62-a, uma tendência da reta da resistência em função do grau de hidratação apresentarem uma inclinação semelhante entre elas, como também com 3 dias as resistências das argamassas são semelhantes entre as argamassas com agregado reciclado e entre as argamassas com agregado leve. Entretanto, a molhagem prévia auxiliou para a melhora da hidratação.

Figura 62: Resistência à compressão e grau de hidratação das argamassas com 3 e 28 dias com incorporação de 300 ppm de cromo.



Em relação ao grau de hidratação do cimento (Figura 62-b) das argamassas com 3 dias de hidratação com agregado reciclado e nas argamassas com agregado leve e realização da molhagem prévia (RCC+Cr 300 ppm+ SAT e ALV+ Cr 300 ppm+ SAT) são superiores às argamassas sem molhagem prévia (RCC+ Cr 300 ppm e ALV+ Cr 300 ppm). Fato este que ocorreu de maneira contrária aos 28 dias. Isto pode ser explicado porque a molhagem prévia auxilia para a melhor hidratação das argamassas no período inicial, enquanto que quando o agregado

foi adicionado seco previamente, houve absorção de parte da água da mistura e essa água foi liberada apenas em períodos tardios, por isso ocorreu esse aumento no grau de hidratação nas argamassas sem molhagem prévia com 28 dias. Mas, essa diferença com 28 dias, entre as argamassas com molhagem prévia e sem molhagem prévia, não é expressiva.

Comparando a Figura 62-a e b, nota-se que estes resultados estão de acordo com os resultados de Q^0 , Q^1 e Q^2 . Uma vez que, que o aumento do pico Q^2 (maior polimerização do C-S-H) tende a aumentar a resistência de forma não proporcional (PARRY-JONES *et al.*, 1989; JIMÉNEZ e PALOMO, 2010).

Na Figura 62-c tem-se o resultado de resistência à compressão em função do grau de hidratação. A resistência aumentou com o grau de hidratação e, nas amostras com molhagem prévia, o grau de hidratação não aumentou expressivamente com o período de hidratação (3,2 % para a argamassa com agregado reciclado e 6 % para a argamassa com agregado leve) quando comparada com as argamassas sem molhagem prévia (aumentou 12 e 14 %, respectivamente, para a argamassa com agregado reciclado e leve). Isso ocorreu porque, a molhagem prévia auxiliou na melhora no período inicial, com aumento expressivo do grau de hidratação com 3 dias.

Com o aumento do período de hidratação (de 3 para 28 dias) ocorreu um aumento considerável da relação Ca/Si. Isto é, com o passar do tempo formam-se géis de C-S-H mais polimerizados, o que ocasionou em uma estrutura que pode ser semelhante a uma estrutura de tobermorita mais ordenada (TRAPOTE-BARREIRA *et al.*, 2015) corroborando com o resultado de DRX, onde verificou-se essa fase.

Comparando a relação Ca/Si das amostras com a liberação de cálcio no ensaio de lixiviação (tanque, item 5.3.2.4), percebeu-se que a relação Ca/Si das amostras foi inversamente proporcional à liberação de cálcio. Isto é, quanto maior a relação Ca/Si, menor foi a liberação de cálcio das amostras, pois quanto menor a relação Ca/Si, maior é a velocidade de dissolução do C-S-H e da portlandita, corroborando com os resultados de Trapote-Barreira *et al.* (2015), que concluíram que esta dissolução ocorre por uma alteração na microestrutura do material quando este está sujeito a um fluxo de água, devido à combinação de efeitos de difusão-transporte e reações químicas. Verificou-se, também, que as amostras com molhagem prévia apresentaram menores relações Ca/Si que as amostras preparadas com o agregado seco previamente e, conseqüentemente, obteve-se uma maior liberação de cálcio nessas amostras.

5.3.2.5.3 Difração de Raios-X

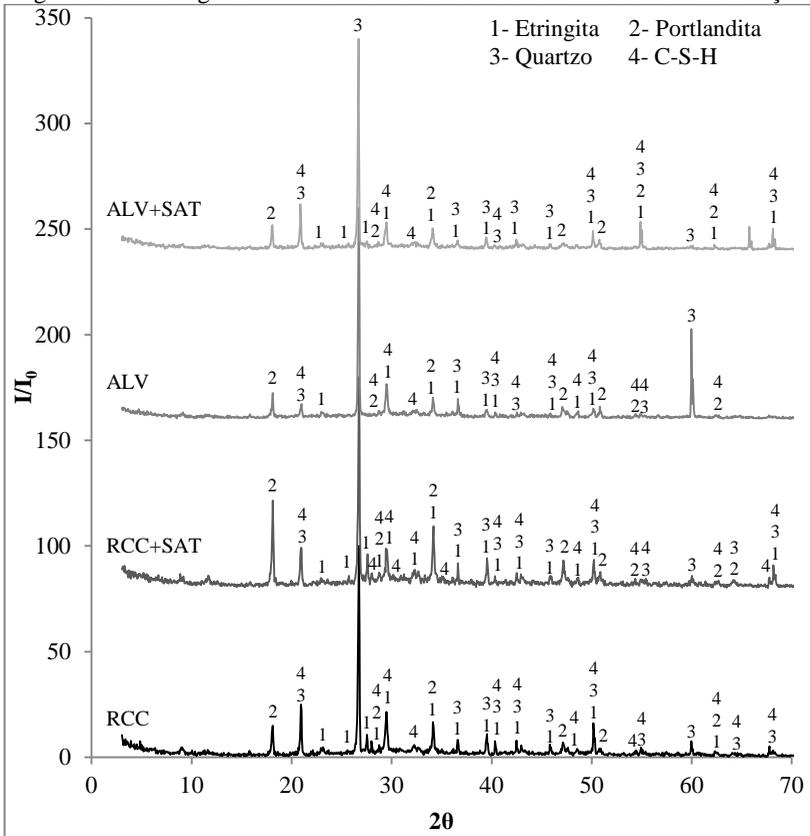
Os difratogramas apresentados a seguir são referentes às amostras de referência com 28 dias (Figura 63), as amostras com 300 ppm de cromo, com 3 e 28 dias (Figura 64 e Figura 65) e as amostras com 300 ppm de zinco com 28 dias (Figura 66). Essas amostras foram escolhidas para complementar a análise de RMN. Na Tabela 51 têm-se todas as fases identificadas e a fórmulas químicas.

Tabela 51: Fases identificadas nos difratogramas.

Fase formada	Código ICSD	Fórmula química
Etringita	155395	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}(\text{H}_2\text{O})_{26}$
Portlandita	15471	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Quartzo	27745	SiO_2
Tobermorita	100405	$\text{Ca}_{2,25}(\text{Si}_3\text{O}_{7,5}(\text{OH})_{1,5})(\text{H}_2\text{O})$
Jenita	151413	$\text{Ca}_9(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{OH})_6(\text{H}_2\text{O})_8$
Cromo filo-tetrassilicato de cálcio	30872	$\text{CaCrSi}_4\text{O}_{10}$
Cromato (VI) de cálcio hidratado	1310	$\text{CaCrO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Zinco tetra-aluminato de cálcio	50293	$\text{Ca}_3\text{Al}_4\text{ZnO}_{10}$
Zinco Silicato de cálcio hidratado	20370	$\text{CaZnSiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

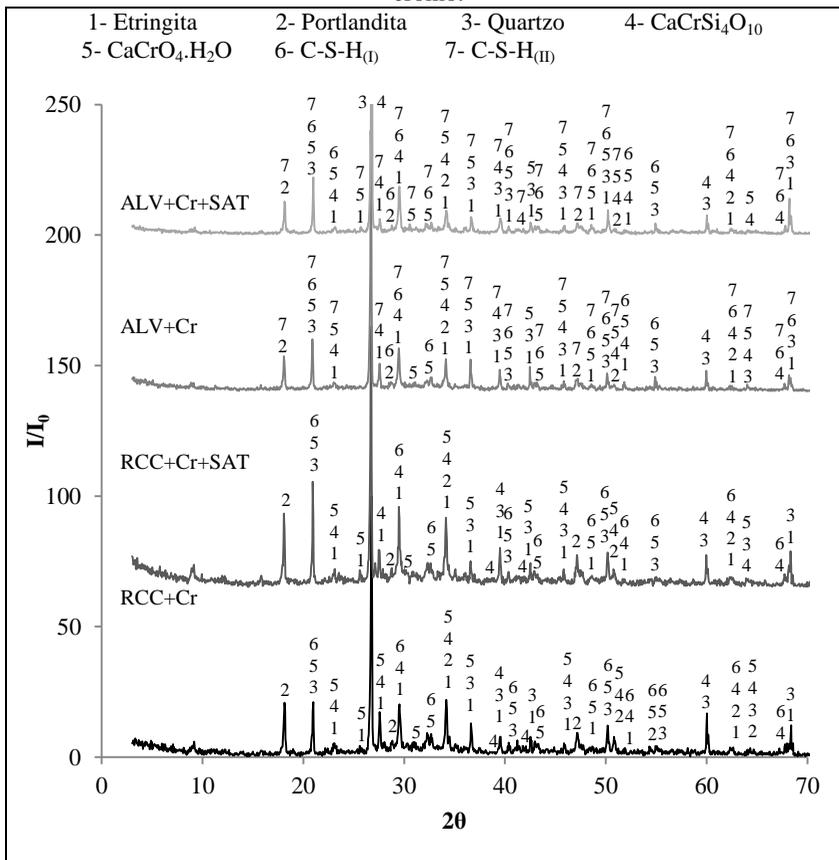
Nas referências com 28 dias de hidratação, foram identificadas as seguintes fases: etringita, portlandita, quartzo e C-S-H tipo I, também chamado de Tobermorita. O quartzo é referente à presença dos agregados que são ricos em SiO_2 e as demais fases são produtos de hidratação do cimento. As argamassas com agregado reciclado (REF-RCC e RCC+SAT) apresentaram uma maior intensidade nos picos em relação às argamassas com agregado leve, em razão da natureza do agregado, o qual além de apresentar fases hidratadas também possui cimento anidro (Figura 63).

Figura 63: Difratograma das amostras de referência com 28 dias de hidratação.



hidratado e pela interação entre o cromo e o silício, respectivamente (LIN, CHEN e LIN, 1997).

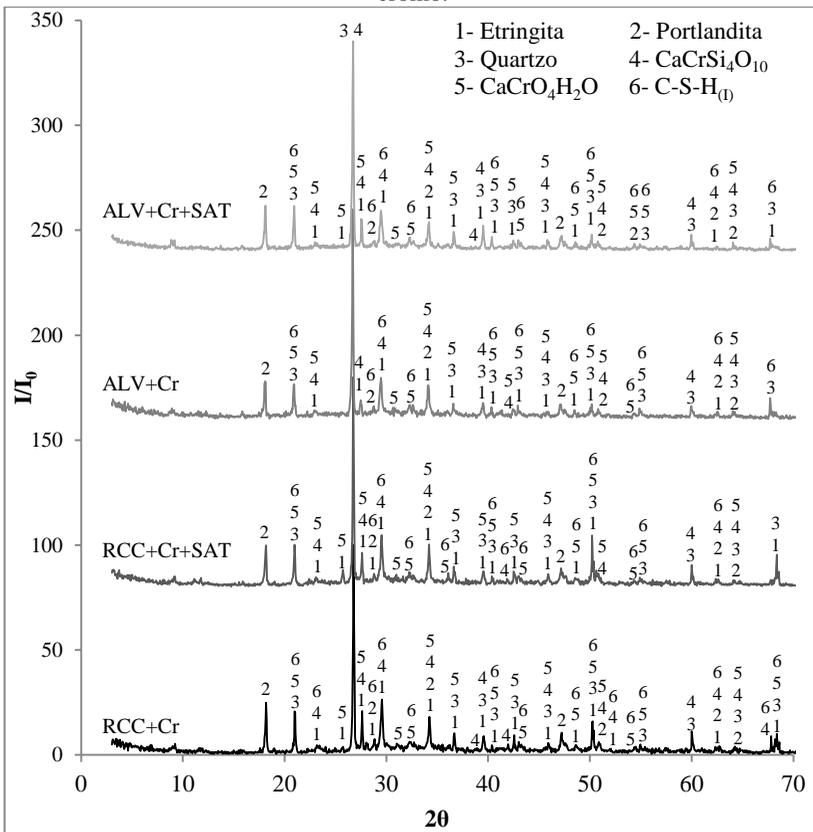
Figura 64: Difratograma das amostras com 3 dias de hidratação e 300 ppm de cromo.



A substituição do Cr^{6+} pelo silício Si^{4+} é possível, pois os seus raios iônico são de 0,044 nm e 0,042 nm, respectivamente. Quando a diferença relativa no raio dos íons é inferior a 15 % ocorrerá uma reação de substituição e formará um cristal estável pela proximidade dos raios iônicos do cromo e do silício. Porém, produzirá um defeito substitucional com distorção da rede por separação dos átomos, pois o raio iônico do cromo é superior ao do silício. Já, a substituição com o cálcio (raio iônico 0,099 nm) não foi encontrada, pois, quando a

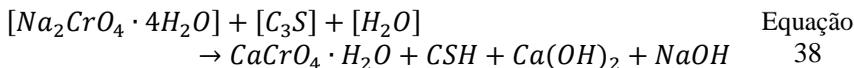
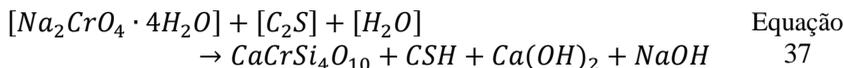
diferença relativa do raio iônico for superior a 30 %, a reação de substituição não ocorrerá (WANG *et al.*, 2016).

Figura 65: Difratoograma das amostras com 28 dias de hidratação e 300 ppm de cromo.



Nas reações químicas da Equação 37 e da Equação 38 sugere-se as possíveis reações de complexação que ocorrem entre o sal de cromato de sódio e os produtos de hidratação do cimento, nos quais precipitaram $\text{CaCrSi}_4\text{O}_{10}$ e $\text{CaCrO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ e também C-S-H puro (não contaminado com o metal pesado), portlandita e hidróxido de sódio. Apenas uma parte do Cr^{6+} desempenha o papel de íons de substituição. Por isso também, foi encontrado a formação de $\text{CaCrSi}_4\text{O}_{10}$, assim como, o cromo foi sorvido pelo agregado poroso e uma pequena parcela foi

lixiviada (verificado no ensaio de sorção do agregado e nos ensaios de compatibilidade ambiental) (LV *et al.*, 2016).



Assim, pelas fases encontradas no difratograma e a possibilidade de identificar os picos que são atribuídos ao cromo no ensaio de RMN, atribuiu-se a retenção do cromo as ligações Cr-O-Cr e Cr-O-Si.

Nas argamassas com agregado leve aos 3 dias de hidratação foram encontradas, além das fases citadas anteriormente, o C-S-H tipo II (Jenita). Comprovando a hipótese levantada no ensaio de RMN, que devido à disponibilidade de uma maior quantidade de SiO₂ além da Tobermorita, também formou-se a fase Jenita (Figura 64).

Embora a intensidade do pico não seja proporcional ao conteúdo das fases cristalinas, algumas informações importantes podem ser obtidas a partir das comparações das intensidades com 3 e 28 dias. As intensidades relativas dos picos das amostras com agregado reciclado (RCC+ Cr 300 ppm e RCC+ Cr 300 ppm+ SAT) com 3 dias de hidratação estão todos menores que aos 28 dias, indicando que a hidratação prosseguiu com o tempo (estando de acordo com o grau de hidratação determinado pelo ensaio de RMN para as amostras com 3 e 28 dias, Tabela 50) e que um maior teor de produtos hidratados precipitaram.

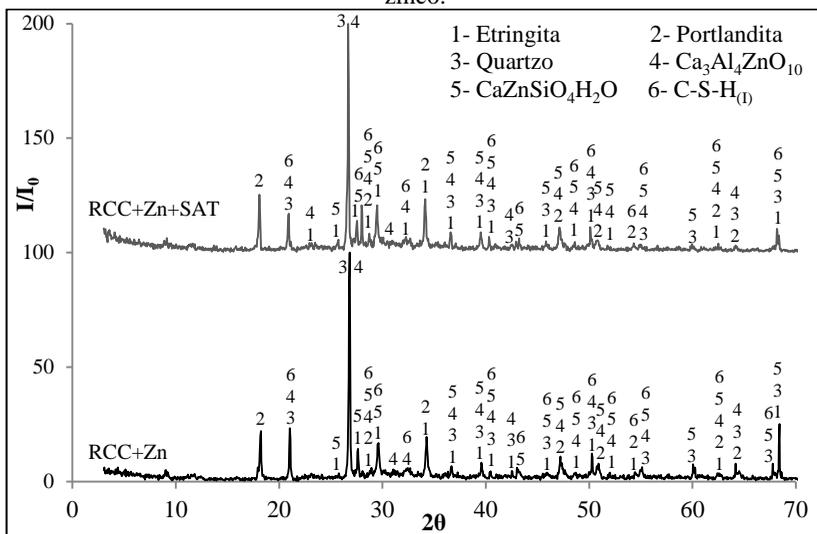
Entretanto, ao comparar as amostras com agregado leve (ALV+ Cr 300 ppm e ALV+ Cr 300 ppm+ SAT), os principais picos referentes à hidratação da Jenita (C-S-H_(II)) são do mesmo tamanho ou maiores aos 3 dias, em relação aos 28 dias, pois com o aumento da hidratação não foi mais observado a fase Jenita ou a sua concentração está abaixo do limite de detecção do DRX, uma vez que ao cessar o teor de SiO₂ extra (fornecida pelo agregado leve, conforme descrito no ensaio de RMN) na solução, continuou a formação de apenas o C-S-H tipo I. Já, os demais picos seguiram a mesma tendência das amostras com agregado reciclado, aumentou as suas intensidades com o aumento do tempo de hidratação.

Na Figura 66 são apresentados os resultados das amostras com agregado reciclado e 300 ppm de zinco aos 28 dias. Nas amostras RCC+ Zn 300 ppm e RCC+ Zn 300 ppm+ SAT foram observadas as fases refe-

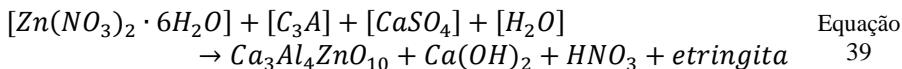
rente à hidratação do cimento (etringita, portlandita, quartzo e C-S-H tipo I) e, devido à incorporação de zinco, verificou-se a formação de novos produtos de hidratação pela precipitação da fase $\text{Ca}_3\text{Al}_4\text{ZnO}_{10}$ (pela reação com o C_3A) e pela sorção no C-S-H, formando $\text{CaZnSiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Figura 66). Corroborando com Moulin *et al.* (2000) e Ziegler *et al.* (2001).

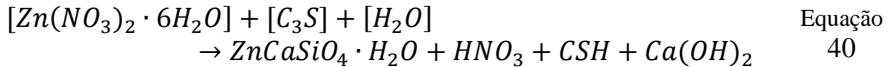
Os resultados de RMN permite atribuir essa retenção à ligação do zinco tetraédrico para as cadeias dos silicatos tetraédricos (ligação Si-O-Zn) do C-S-H_(I) (MOULIN *et al.*, 2000; ZIEGLER *et al.*, 2001).

Figura 66: Difratoograma das amostras com 28 dias de hidratação e 300 ppm de zinco.



Nas reações químicas de complexação apresentadas na Equação 39 e na Equação 40 sugerem-se as possíveis reações do nitrato de zinco incorporado na argamassa: na Equação 39 tem-se a reação com o C_3A ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) no qual precipita $\text{Ca}_3\text{Al}_4\text{ZnO}_{10}$, portlandita, etringita e ácido nítrico; já na Equação 40 sugere-se a ligação do nitrato de zinco com o C_3S , formando C-S-H contaminado com Zn, C-S-H puro, portlandita e ácido nítrico.





A retenção do zinco por aluminato de cálcio é essencialmente controlada pela precipitação do hidróxi-zincato de cálcio ($CaZn_2(OH)_6 \cdot 2H_2O$) (MOULIN *et al.*, 2000). Porém, essa fase é encontrada em idades iniciais (2 dias) e aos 28 dias não é mais detectada, sugerindo que a fase hidróxi-zincato de cálcio é uma fase intermediária e subsequente o zinco é incorporado no C-S-H, pois o hidróxido do metal pode ser adsorvido pela superfície negativa da Tobermorita em pH elevado (GINEYS, AOUAD e DAMIDOT, 2010).

Na amostra sem molhagem prévia (RCC+ Zn 300 ppm), a intensidade dos picos foi superior à amostra com molhagem prévia (RCC+ Zn 300 ppm+ SAT), corroborando com o ensaio de lixiviação, uma vez que a amostra RCC+Zn 300 ppm liberou menor teor de cálcio.

5.3.2.6 Conclusões parciais

As conclusões obtidas da caracterização das argamassas no estado endurecido são as seguintes:

Em relação à massa específica, quando substituído 25 % do agregado natural por agregado leve houve uma redução de 7,3 a 13,6 %. Ao substituir o agregado natural por agregado reciclado de concreto, a redução da massa específica não foi significativa (variando de 0,9 a 3,2 %).

A absorção das argamassas foi influenciada pelo tipo do agregado utilizado, quando comparado às argamassas com agregado poroso (ALV e RCC) com a REF-AN, com um aumento da absorção de 11,3 a 22,5 % quando utilizado agregado poroso devido à maior absorção e porosidade desse agregado. Entretanto, entre as argamassas com agregado poroso, o tipo do agregado não influenciou na absorção mesmo com o agregado leve apresentando uma absorção muito superior ao agregado reciclado. Essa absorção semelhante ocorreu, pois, a pasta de cimento preencheu os poros do agregado leve, reduzindo o potencial de absorção desse material.

Sobre os resultados de resistência mecânica:

- A resistência final foi influenciada pelas propriedades mecânicas dos agregados utilizados. Porém, em idades iniciais, a utilização do agregado poroso foi benéfica. Diferentemente das argamassas produzidas com apenas agregado natural, aonde o componente mais fraco foi a ZTI, nas argamassas com agregado leve, o componente mais fraco foi o

próprio agregado, sendo a resistência final limitada pela resistência do mesmo.

- Nos resultados de resistência à tração na flexão evidenciou-se a eficiência da cura interna, uma vez que as argamassas com agregado leve e com agregado reciclado apresentaram resistências semelhantes à referência com apenas agregado natural. Isso também foi verificado no ensaio de resistência à compressão com 1 dia de hidratação do cimento. Ou seja, a cura interna, em todos os casos, melhorou a hidratação impactando no aumento de resistência das argamassas no período inicial, devido à menor permeabilidade e maior densidade na zona de transição interfacial das argamassas com agregados leves e reciclados.

- A menor resistência à compressão das argamassas com incorporação dos metais pesados (Pb, Cr ou Zn), nas idades iniciais (1 e 3 dias), em relação às suas respectivas referências, ocorreu devido à influência dos metais que reagiram com o cimento, formando novos compostos.

Nas micrografias, verificou-se que ao redor do agregado poroso não distinguia-se a ZTI devido à melhor hidratação que resultou em uma microestrutura mais densa, menos permeável e porosa.

Sobre os resultados de RMN:

- O grau de hidratação das argamassas foi influenciado, também, pelo tipo do agregado utilizado. Em todos os casos, o agregado leve apresentou um maior grau de hidratação em relação às argamassas produzidas com agregado reciclado.

- As argamassas com agregado leve e incorporação de 300 ppm de cromo inicialmente (3 dias) formam géis mais ordenados e com cadeia mais compridas, devido à formação do gel C-S-H_{II}; em idades tardias (28 dias), já foi consumido todo SiO₂, originando-se o C-S-H_I e, resultando na redução do comprimento médio da cadeia do gel.

Sobre os resultados da compatibilidade ambiental:

- As argamassas sem molhagem prévia do agregado poroso apresentaram uma maior retenção dos metais pesados. Pois, quando os agregados são utilizados secos previamente, ao entrar em contato com a água de amassamento saturada com o metal pesado, o mesmo funciona como um sorvente químico e absorveu/ adsorveu o metal pesados juntamente com a água e, como essa água será liberada apenas em idades tardias, o metal não é liberado por preenchimento dos poros do agregado com pasta de cimento ou por estar retido em algum poro muito pequeno do agregado. Quando o agregado foi utilizado saturado previamente com água destilada/ deionizada e com o metal pesado, o agregado absorveu/ adsorveu o metal e, ao ser colocado na argamassa em contato com diferentes umidades relativas, a água do seu interior foi liberada juntamente

com o metal pesado. No entanto, uma parte do metal pesado ficou retida no interior do agregado, outra parte foi ligada com os produtos hidratados do cimento, por sorção, substituição ou por precipitação de uma nova fase e a parte lixiviada ficou adsorvida na superfície dos grãos de cimento anidros ou nos poros da argamassa. A densificação da zona de transição interfacial foi eficiente para auxiliar na redução da lixiviação dos metais pesados. Em resumo, o agregado reciclado auxilia no processo de solidificação/ estabilização de metais pesados como sorvente químico eficaz para a retenção dos metais pesados presentes no material.

As distâncias percorridas pela água nas argamassas com agregado reciclado foram compatíveis com as distâncias percorridas pela água verificadas nas argamassas com agregado leve. Como o agregado leve é mais poroso, absorvente e frágil que o agregado reciclado, a substituição do agregado leve por agregado reciclado apresentou vantagens, principalmente em relação às propriedades mecânicas.

O agregado reciclado foi eficiente como agente de cura interna. Entretanto, depende da condição inicial do agregado no preparo do material cimentício para determinar o período da eficiência do agregado. Uma vez que, ao utilizar o agregado saturado previamente, o mesmo auxiliará para a melhor hidratação nas idades iniciais (até 7 dias) com redução da permeabilidade e porosidade na zona de transição interfacial (em média 5 %), com aumento da resistência mecânica (em média 9 %) e do grau de hidratação (em média 25 %) em relação as argamassas preparadas com o agregado seco previamente. Já, ao adicionar o agregado reciclado seco previamente, o mesmo absorve parte da água da mistura e essa água é liberada em idades médias a tardias (de 7 dias em diante) para a melhora da hidratação, fato evidenciado pelo aumento do grau de hidratação (em média 2 %) e da resistência mecânica (em média 15 %), redução da retração por secagem e redução da porosidade e permeabilidade na zona de transição, em relação ao material cimentício preparado com o agregado saturado previamente.

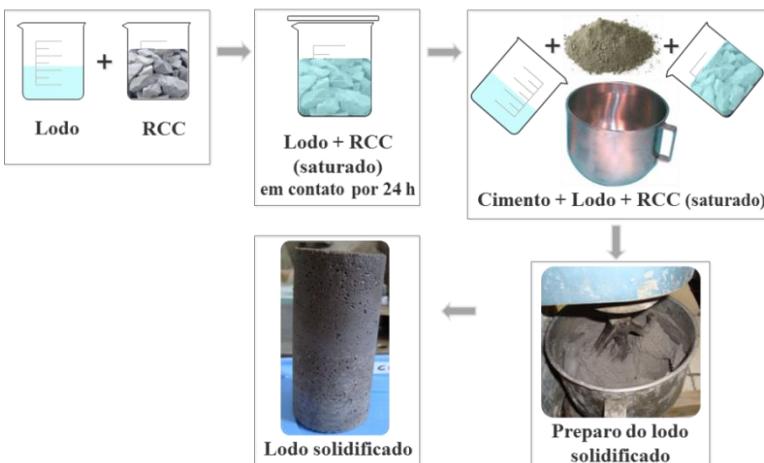
6 APLICAÇÃO DO LODO DE GALVANOPLASTIA (CASO REAL)

A partir da análise do efeito dos agregados porosos na pasta da argamassa e da capacidade de retenção dos contaminantes sintéticos foi testado o efeito dos agregados num sistema composto com resíduo de galvanoplastia.

Elaborou-se um procedimento teve por base: as características de absorção do agregado poroso e a composição do esqueleto granular com as mesmas dimensões, respeitando-se as relações X% nas dimensões de grão (2,4; 1,2 e 0,6 mm) e a retenção de metal pesado. O procedimento consistiu em (Figura 67):

- a) determinar a absorção da faixa granulométrica estipulada;
- b) colocar em contato o agregado poroso com o lodo em um recipiente hermeticamente fechado por um período que pode variar dependendo da velocidade de absorção do agregado, recomenda-se 24 horas para saturar até a condição saturada superfície seca (no caso, 4 % em relação à massa de cimento);
- c) preparar o material solidificado: adicionando-se o cimento Portland e um maior teor de lodo (dependendo da absorção do agregado poroso, no caso 96 % em relação a massa de cimento) até alcançar a relação a/c estipulada (recomendado no máximo 0,5), no agregado poroso saturado com lodo.

Figura 67: Procedimento de aplicação do RCC e do lodo no sistema de S/E.



Esse procedimento teve duplo objetivo: redução das concentrações de metais pesados dos resíduos industriais, que por vezes são elevadas, e redução do consumo de cimento. O produto final será uma argamassa e não um produto solidificado somente com cimento, como é o caso do produto do processo de solidificação/ estabilização.

Para verificar a eficiência do procedimento, recomenda-se a realização dos seguintes ensaios: resistência mecânica, absorção e lixiviação (ensaio de tanque e TCLP).

Caso o resíduo industrial não seja o mesmo que o utilizado nessa pesquisa, recomenda-se também, a reprodução do procedimento proposto com as adequações necessárias, em casos que o teor de líquido do resíduo utilizado for inferior ao tratado nesse estudo.

Assim, nesta parte da pesquisa serão descritos e analisados os resultados do procedimento proposto do lodo solidificado com agregados porosos no processo de solidificação/ estabilização. Para isso, realizou-se a substituição parcial de 8,5 % e substituição total de 100 % da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia (lodo), em duas configurações de misturas distintas, 1: 3 e 1: 2,5 (cimento: agregados) e relação água/ cimento 0,42, em todas as composições.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

6.1.1 Propriedades físicas dos agregados

Na Tabela 52 são apresentados os resultados das propriedades física dos agregados. A massa específica, a massa unitária e o índice de vazios foram influenciados pela natureza do agregado. Essa influência foi devido ao fato que o agregado leve é oriundo de material argiloso e apresenta alta porosidade em relação aos demais agregados, conforme verificado no valor do índice de vazios. Enquanto que, o agregado natural e o agregado reciclado apresentam características semelhantes, de acordo com os resultados, houve redução de 3,8 % da massa específica, 21,7 % da massa unitária e aumento de 31,5 % do índice de vazios da curva granulométrica do agregado reciclado. Essa diferença foi devido à pasta de cimento aderida aos grãos do agregado reciclado.

Tabela 52: Propriedades físicas dos agregados.

	Frações/ Curvas	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Índice de vazios (%)	Absorção (%)	
					24 horas	48 horas
AN	2,4 mm	2,64	1,51	42,6	0,6	-
	1,2 mm	2,61	1,53	41,5	0,7	-
	0,6 mm	2,63	1,57	40,2	0,9	-
	0,3 mm	2,63	1,52	42,1	1,1	-
	0,15 mm	2,56	1,41	44,8	1,8	-
	D/d= 2,4/ 0,15 mm	2,64	1,66	37,1	0,5	-
RCC	2,4 mm	2,56	1,22	52,4	4,0	4,2
	1,2 mm	2,52	1,22	51,7	5,1	6,0
	0,6 mm	2,47	1,17	52,8	6,5	7,9
	D/d= 2,4/ 0,6 mm	2,54	1,30	48,8	5,0	6,4
ALV	2,4 mm	0,96	0,30	68,7	39,3	41,3
	1,2 mm	1,08	0,31	71,1	45,2	45,8
	0,6 mm	1,32	0,32	76,0	45,9	46,8
	D/d= 2,4/ 0,6 mm	1,18	0,32	72,8	41,3	43,4

Nota: AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve.

A absorção por imersão foi influenciada pela dimensão do agregado, conforme reduziu a fração granulométrica, aumentou o consumo de água, devido à maior área superficial. A absorção do agregado leve foi extremamente superior à absorção do agregado natural e do agregado reciclado, com aumentos de até 82,6 % entre as curvas granulométricas. A absorção da curva granulométrica do agregado reciclado (5,0 %) está dentro do limite estipulado pela norma NBR 15116 de 2004, que prevê absorção inferior ou igual a 12 % para agregados miúdos (< 4,8 mm) oriundos de concreto destinado ao preparo de concreto sem função estrutural.

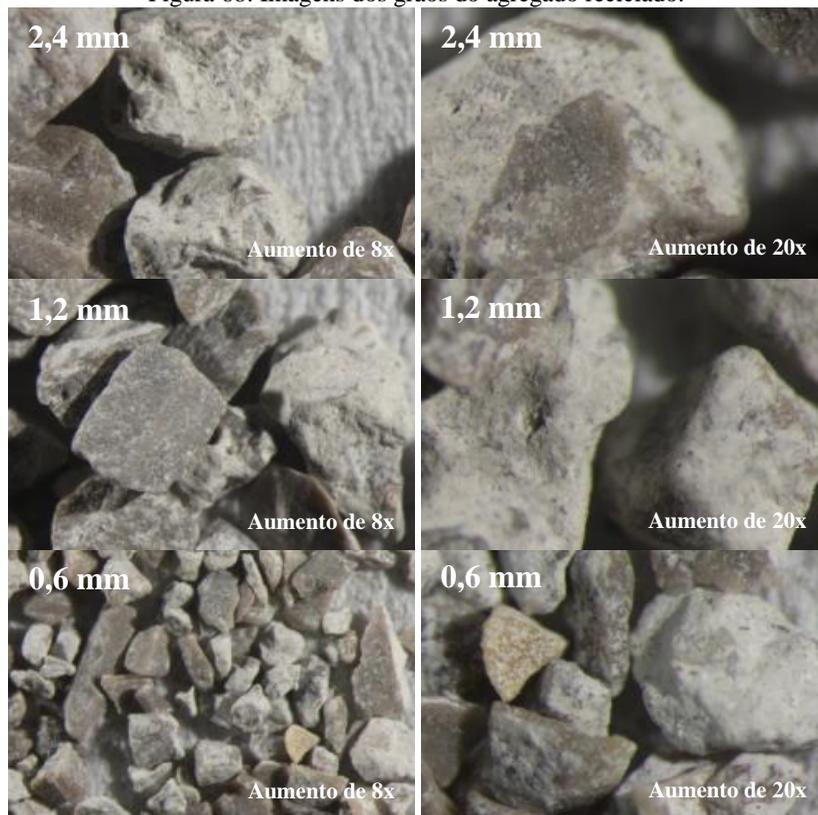
Os valores de massa específica e absorção por imersão (24 horas) para o agregado natural e o agregado reciclado estão de acordo com o trabalho de Yildirim, Meyer e Herfellner (2015).

Na Figura 68 e Figura 69 são apresentadas as imagens dos agregados reciclados e leves, obtidas com o auxílio de uma câmera digital acoplada em um microscópio óptico.

O agregado reciclado é denso, com pouca presença de poros, fato confirmado pela alta massa específica e baixa absorção de água (Figura 68). Verificou-se, também, a presença da pasta de cimento ao redor dos grãos do agregado natural. Bem como, pelo agregado natural, que é composto o agregado reciclado, ser oriundo de calcário não foi possível realizar o ataque ácido para determinar o teor de pasta de cimento que contém nos grãos, pois o ácido clorídrico utilizado no ensaio de ataque

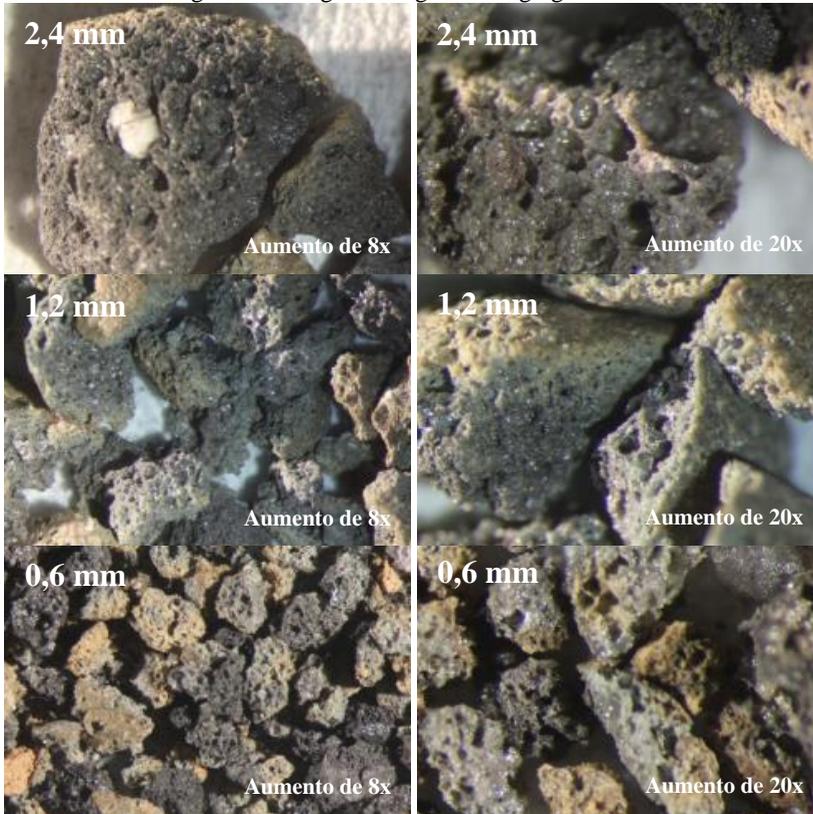
ácido ataca também, o agregado de origem calcária, levando à superestimação do teor de pasta (JUAN e GUTIÉRREZ, 2009).

Figura 68: Imagens dos grãos do agregado reciclado.



Já, o agregado leve (Figura 69) apresentou porosidade maior e uniforme, com toda a dimensão dos grãos apresentando poros visíveis, corroborando com os resultados de propriedades físicas (massa específica, massa unitária, índice de vazios e absorção dos grãos) apresentados na Tabela 52. Os poros do grão do agregado leve são perfurados nas laterais por poros menores, apresentando poros interligados, o que auxiliou para a alta absorção do agregado. Essa alta porosidade foi o que auxiliou para o desempenho do agregado como agente de cura interna (GHOURECHIAN *et al.*, 2013).

Figura 69: Imagens dos grãos do agregado leve.



6.1.2 Lixiviação

Na Tabela 53 são apresentados os resultados da análise química do ensaio de conformidade realizado na curva granulométrica dos agregados. Não houve lixiviação acima do limite de detecção do equipamento de fluoretos, bário, cromo, molibdênio e níquel, para os três agregados estudados. O agregado natural lixiviou um teor superior de cobre, chumbo e zinco em relação ao agregado reciclado e ao agregado leve. Houve um maior teor de sulfato e o aumento do pH e da condutividade elétrica do agregado reciclado, devido à presença do material cimentício no agregado.

Tabela 53: Análise química do líquido lixiviado.

Material	Cu	Pb	Zn	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	pH	Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
AN	0.17	0.03	1.91	<L.D.	0.56	7.7	34.8
ALV	<L.D.	0.01	0.66	13.91	9.38	8.7	133.3
RCC	<L.D.	<L.D.	0.30	0.83	12.91	10.2	167.5

Nota: <L.D. = inferior ao limite de detecção do equipamento; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve.

6.1.3 Sorção dos agregados

Na Tabela 54 são apresentados os resultados da análise química da primeira etapa do ensaio de sorção (água destilada e deionizada com o metal de interesse após 24 horas em contato com o agregado poroso).

Os agregados reciclado e leve absorveram/ adsorveram o metal pesado em sua estrutura, uma vez que em todos os casos a solução foi preparada com 300 ppm do metal de interesse e em nenhum caso lixiviou os 300 ppm. A maior lixiviação foi obtida quando utilizado a solução com cromo, as quais liberaram, aproximadamente, 271 mg/L quando utilizado o agregado leve e 238 mg/L quando utilizado o agregado reciclado. O metal que menos lixiviou foi o chumbo, com menos de 10 mg/L lixiviado nos dois agregados avaliados.

Em relação ao cálcio, que não foi adicionado à solução, foi o que mais lixiviou no agregado reciclado, devido à presença da pasta de cimento, a qual é composta, principalmente, por hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado. No agregado leve, também, foi liberado pois, de acordo com a análise química (Tabela 9), o agregado apresentou 3,14 % de CaO em sua estrutura.

O pH das soluções com agregado reciclado ficaram, em todos os casos, superior às soluções com agregado leve devido à pasta de cimento envolvida no agregado reciclado, a qual apresenta um pH básico. Bem como, a condutividade das soluções com agregado reciclado foram superiores às soluções com agregado leve devido ao maior teor de cálcio lixiviado, uma vez que a condutividade elétrica está diretamente ligada à movimentação dos íons na solução, e na solução com agregado reciclado, apresentou maior teor de íons.

Tabela 54: Análise química da solução.

SOLUÇÃO COM 300 PPM DE CHUMBO		
Elementos	ALV	RCC
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)
Ca	32,25	2227,55
Cr	0,01	0,05
Pb	0,01	9,65
Zn	2,05	0,01
pH	8,810	11,270
Condutividade	275,80 $\mu\text{S}/\text{cm}$	693,40 $\mu\text{S}/\text{cm}$
SOLUÇÃO COM 300 PPM DE CROMO		
Elementos	ALV	RCC
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)
Ca	0,01	1878,55
Cr	271,65	238,25
Pb	0,01	1,75
Zn	0,05	1,35
pH	9,644	11,511
Condutividade	606,70 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1367,50 $\mu\text{S}/\text{cm}$
SOLUÇÃO COM 300 PPM DE ZINCO		
Elementos	ALV	RCC
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)
Ca	79,45	280,15
Cr	5,45	0,01
Pb	0,01	0,01
Zn	222,65	32,95
pH	6,702	10,918
Condutividade	470,30 $\mu\text{S}/\text{cm}$	696,80 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Na Tabela 55 são apresentados os resultados da análise química após a segunda etapa do ensaio de sorção (que consistiu em realizar o ensaio de conformidade nos grãos com o metal sorvido). Em todos os casos, a lixiviação foi inferior a 6 mg/L, ou seja, os metais pesados foram complexados nos agregados e/ou foram precipitados na superfície dos poros dos agregados poroso. Após o ensaio de conformidade, a liberação de cálcio foi ínfima em todas as amostras, pois todo o cálcio livre já foi liberado na primeira etapa.

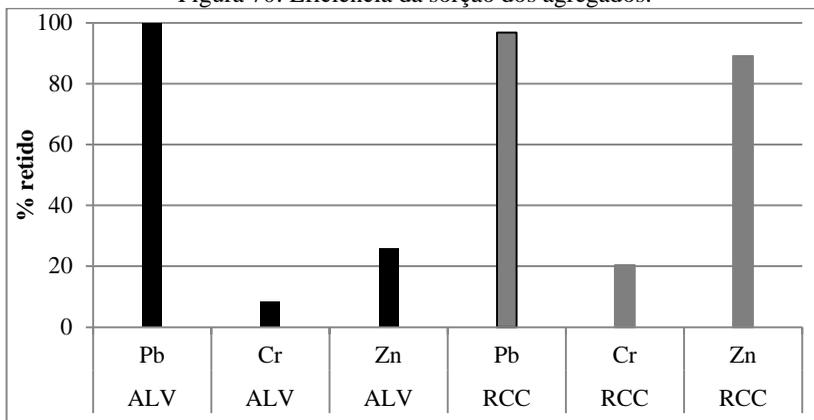
O pH, em todos os casos estudados, permaneceu acima de 9. Porém, o pH das amostras com agregado reciclado continuaram sendo superiores ao pH da solução com agregado leve. Assim como, a condutividade elétrica das soluções continuou superior nas amostras com agregado reciclado quando comparadas com a primeira etapa do ensaio.

Tabela 55: Análise química após o ensaio de conformidade.

CHUMBO		
Elementos	ALV	RCC
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)
Ca	0,01	0,01
Cr	5,95	4,45
Pb	0,01	0,01
Zn	0,01	0,01
pH	9,153	10,938
Condutividade	71,22 $\mu\text{S}/\text{cm}$	223,80 $\mu\text{S}/\text{cm}$
CROMO		
Elementos	ALV	RCC
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)
Ca	0,01	0,01
Cr	3,35	0,65
Pb	0,01	0,01
Zn	0,65	0,95
pH	9,459	10,975
Condutividade	120,40 $\mu\text{S}/\text{cm}$	268,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$
ZINCO		
Elementos	ALV	RCC
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)
Ca	0,01	0,01
Cr	0,01	1,65
Pb	0,01	0,01
Zn	0,05	0,01
pH	9,073	10,815
Condutividade	61,87 $\mu\text{S}/\text{cm}$	231,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$

De acordo com os resultados das análises químicas realizadas nas duas etapas do ensaio (Tabela 54 e Tabela 55) foi calculada a eficiência do agregado reciclado e do agregado leve como sorvente químico. Na Figura 70 têm-se o agregado poroso com o metal pesado de interesse em função da porcentagem retida nos grãos da curva granulométrica. Fica clara a eficiência dos dois agregados em absorver/ adsorver o chumbo em sua estrutura. Igualmente, o agregado reciclado, devido à presença da pasta de cimento ao redor dos grãos, apresentou maior eficiência como sorvente químico, uma vez que absorveu/ adsorveu em sua estrutura 90 % do zinco e mais que 20 % do cromo hexavalente. Enquanto, o agregado leve apresentou uma retenção do zinco inferior a 26 % e do cromo inferior a 9 %.

Figura 70: Eficiência da sorção dos agregados.



6.1.4 Conclusões parciais

Os agregados leves são mais porosos, apresentando maior quantidade de macro poros na superfície e maior capacidade de absorção que os agregados reciclados. Entretanto, a alta massa específica do agregado reciclado e a baixa absorção de água são propriedades apreciáveis para substituir o agregado natural.

Em relação ao ensaio de sorção do agregado, fica claro, que os dois agregados podem ser utilizados como sorventes químicos, com praticamente 100 % do chumbo retido nos dois agregados. Porém, em relação ao cromo e ao zinco, o agregado reciclado foi mais eficiente absorvendo/ adsorvendo 90 % do zinco e mais de 20 % do cromo.

De acordo com os ensaios realizados nos grãos dos agregados, o agregado leve tem características que o consideram como um agente de cura interna mais eficiente que o agregado reciclado. Entretanto, não se pode descartar o agregado reciclado como agente de cura interna sem realizar ensaios em materiais cimentícios, o qual será o próximo passo. Uma vez que, foi determinado na Parte 01 do trabalho que o agregado reciclado pode ser utilizado como um agente de cura interna eficaz em materiais cimentícios.

6.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE GALVANOPLASTIA

A caracterização química do resíduo de galvanoplastia foi realizada com base nos processos desenvolvidos na empresa doadora (cro-

magem, niquelagem e cobreagem) e os metais pesados incorporados na argamassa na primeira parte da pesquisa (cromo, chumbo e zinco).

Na Tabela 56 é apresentada a análise química, realizada no ICP-OES, do resíduo de galvanoplastia após o ensaio de ataque por água régia. O resíduo é composto majoritariamente por níquel e cromo. O cromo foi encontrado em um teor superior ao utilizado na primeira parte da pesquisa (300 mg/L), bem como o zinco e o chumbo estão presentes no resíduo em teor inferior ao utilizado.

A perda de massa ao fogo do resíduo foi de 14,5 %, realizada colocando o mesmo na mufla a 1000 °C por um período de 2 horas.

Foi, também, determinada a porcentagem de sólido e de água no resíduo de galvanoplastia, colocando o mesmo por 24 horas no banho de areia a 100 °C. O resultado obtido foi de 2 % de resíduos sólidos e 98 % de água. Para complementar a caracterização do resíduo, realizou-se a análise de fluorescência de raios-X após a calcinação a 1000 °C (Tabela 57).

Tabela 56: Análise química do resíduo de galvanoplastia.

Elementos	Lodo
Ni	496,52 mg/L
Cr	406,29 mg/L
Cu	120,44 mg/L
Zn	61,70 mg/L
Pb	< 40 mg/L*
Perda ao fogo	14,5 %

Nota: *40 mg/L é o limite de detecção do equipamento.

Tabela 57: Análise de fluorescência de raios-X.

Fórmula do composto	Concentração (%)
Na ₂ O	25,47
SO ₃	23,01
Cl	11,12
NiO	7,12
Cr ₂ O ₃	6,04
CaO	3,93
K ₂ O	2,45
SiO ₂	1,43
MgO	1,31
CuO	1,31
P ₂ O ₅	0,99
Fe ₂ O ₃	0,63
ZnO	0,36
Al ₂ O ₃	0,31
SrO	0,05

6.3 CARACTERIZAÇÃO DO LODO SOLIDIFICADO

6.3.1 Estado fresco

As propriedades físicas (massa específica, teor de ar incorporado, trabalhabilidade e consumo de cimento) do lodo em processo de solidificação com o traço 1: 3 e com o traço 1: 2,5, produzidas com substituição de 0, 8,5 e 100 % da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia estão apresentados no APÊNDICE 3.

Os resultados de massa específica ficaram entre 1,58 e 2,24 g/cm³, teor de ar incorporado entre 3,8 e 31,7 %, trabalhabilidade entre 106 e 218 mm e o consumo de cimento ficou entre 396,6 e 575,2 kg/m³.

6.3.1.1 Calor de hidratação

Foi avaliado o calor de hidratação da pasta de cimento pura e com 8,5 % de resíduo de galvanoplastia em relação ao teor total de água, esse teor de resíduo foi determinado por ser o mesmo utilizado nas argamassas. As pastas foram produzidas com relação a/c 0,42. O ensaio foi realizado para verificar a influência do resíduo com apenas o cimento Portland (CEM II). Os resultados encontram-se no APÊNDICE 3. A substituição parcial (8,5 %) da água de amassamento pelo lodo reduziu o calor gerado (5 %) e o grau de hidratação (4 %) das pastas.

Na Tabela 58 são apresentados os resultados do ensaio de calor de hidratação das argamassas. Em relação ao calor de hidratação da pasta de cimento (verificado no item anterior), a incorporação de agregado na pasta reduziu consideravelmente o calor máximo gerado e o grau de hidratação. Em todos os casos, as argamassas que apresentaram o maior atraso para iniciar e terminar a hidratação, o menor calor gerado e o menor grau de hidratação foram às argamassas com substituição parcial do agregado natural por agregado leve, sendo que o menor grau de hidratação foi das amostras com o traço 1: 3, não sendo influenciado pela substituição parcial da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia. Isso é explicado pelo menor teor de cimento nessas argamassas, bem como pela presença de sulfato no agregado leve, mesmo sendo em uma concentração inferior ao agregado reciclado, o sulfato no agregado leve está em uma forma mais solúvel.

Como esperado, em todos os casos de substituição parcial da água de amassamento pelo resíduo de galvanoplastia, no traço 1: 3, foram obtidos os menores valores de grau de hidratação e máximo calor gerado, com exceção para o RCC+LODO. Já, quando substituído 100 %

da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia, os maiores resultados do máximo calor gerado foram às argamassas com o traço 1: 3, uma vez que no traço 1: 2,5 têm-se a presença de maior teor de grãos de cimento, que sofrem maior influência do resíduo. Porém, em relação ao grau de hidratação, com 100 % de resíduo, não houve alteração, independente do traço, variando apenas pelo tipo de agregado.

Em todos os casos, as argamassas produzidas com o agregado reciclado seco previamente, apresentaram resultados semelhantes às argamassas de referência com apenas agregado natural, independente do traço e da incorporação do resíduo.

Tabela 58: Dados do ensaio de calor de hidratação.

	Material/ Argamassas	Início pega (h:min)	Fim pega (h:min)	Δt (h:min)	Max Qi (J/kg)	$Q_{m\acute{a}x}$ (J/kg)	α (%)	
8,5 % DE LODO	TRAÇO 1 : 3	REF-AN	4:12	6:23	2:11	78,67	253,94	62,0
		REF-ALV	6:20	9:44	3:24	46,70	158,26	38,7
		ALV + SAT	5:42	8:54	3:12	47,31	155,46	38,0
		REF-RCC	3:23	6:23	3:00	75,87	205,13	50,1
		RCC + SAT	3:53	6:03	2:10	65,09	198,58	48,5
		REF-AN	3:11	6:12	3:01	76,75	215,29	52,6
	REF-ALV	6:20	10:12	3:52	51,67	153,17	37,4	
	ALV + SAT	5:31	9:24	3:53	54,61	174,33	42,6	
	REF-RCC	3:17	6:06	2:49	74,53	211,40	51,6	
	RCC+LODO+SAT	4:11	6:54	2:43	65,44	179,07	43,7	
	REF-AN	3:17	7:02	3:45	84,64	253,91	62,0	
	REF-ALV	4:25	8:53	4:28	65,83	260,28	63,6	
	ALV + SAT	4:18	8:42	4:24	71,88	246,86	57,8	
	REF-RCC	3:23	7:00	3:37	82,17	260,28	63,6	
	RCC + SAT	3:24	7:18	3:54	95,63	306,25	72,1	
	AN + LODO	3:20	6:53	3:33	77,10	234,82	57,4	
	ALV + LODO	5:40	9:30	3:50	48,45	167,75	41,0	
	ALV+LODO+ SAT	4:48	9:10	4:22	58,43	190,52	46,5	
RCC + LODO	3:17	6:48	3:31	62,75	190,87	46,6		
RCC+LODO+SAT	3:18	6:44	3:26	75,88	228,51	55,8		
100% LODO	1 : 3	AN + LODO	3:47	7:14	3:27	81,73	225,84	55,2
		ALV + LODO	4:58	8:52	3:54	64,01	169,04	41,3
		RCC + LODO	3:41	7:01	3:20	74,80	210,87	51,5
	1:2,5	AN + LODO	4:00	6:59	2:59	72,35	206,39	54,0
		ALV + LODO	5:33	9:18	3:45	52,92	164,68	44,3
		RCC + LODO	3:56	6:55	2:59	67,07	195,41	51,3

Nota: Max Qi= Máximo calor gerado; $Q_{m\acute{a}x}$ = Calor total gerado; α = grau de hidratação; REF= referência; AN= areia padrão; RCC= agregado reciclado; ALV= agregado leve; SAT= saturado previamente; LODO = resíduo de galvanoplastia.

Na Figura 71 e Figura 72 são apresentadas as curvas da evolução do calor das argamassas com o traço 1: 3. A molhagem prévia do agre-

gado nas argamassas com agregado leve não influenciou no calor gerado dessas argamassas. Porém, nas argamassas com agregado reciclado, as argamassas sem molhagem prévia do agregado apresentaram o maior calor gerado. Pois, pelos agregados serem adicionados secos ao preparo das argamassas, podem ter absorvido parte da água de amassamento conjuntamente com o metal pesado presente nele. Verificou-se a presença do primeiro pico (que é referente à hidratação do C_3A e ocorre nos primeiros minutos da hidratação). Bem como, fica claro a influência causada pela utilização do agregado leve na hidratação das argamassas, o qual retardou o início da hidratação e reduziu o calor gerado pela presença de sulfato em sua composição.

Figura 71: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de referências com o traço 1:3.

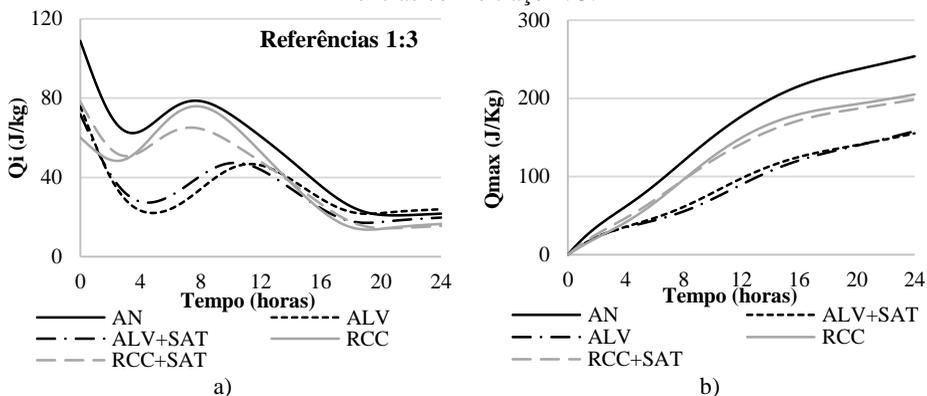
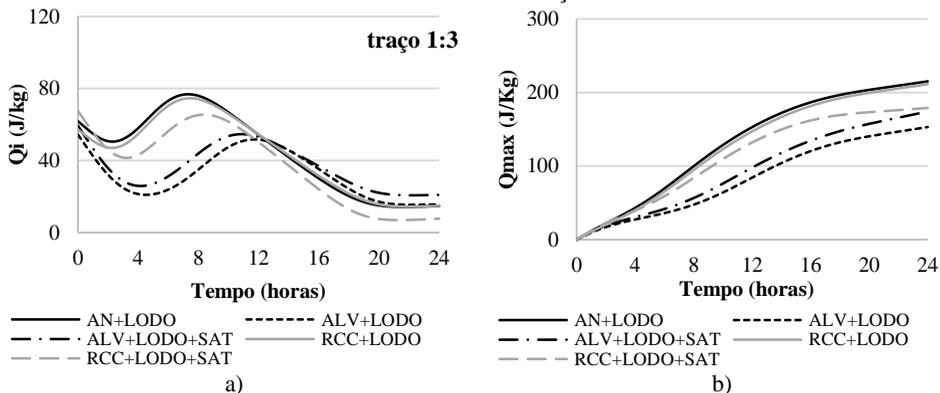


Figura 72: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas com 8,5 % de resíduo com o traço 1:3.



Na Figura 73 e Figura 74 são apresentadas as curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas com o traço 1: 2,5. Nessas argamassas, a ausência do primeiro pico, referente à hidratação do C_3A , foi devido à demora entre o preparo da argamassa e o início do ensaio. Essas argamassas apresentaram o maior calor gerado, pela presença do maior teor de cimento, bem como, houve a redução do calor gerado nas argamassas com substituição parcial da água de amassamento por resíduo (Figura 74), devido à influência do resíduo com a hidratação do cimento. Nas amostras com resíduo e sem resíduo, a molhagem prévia resultou no aumento do calor gerado, devido ao auxílio na hidratação dessas argamassas, pela maior disponibilidade de água.

Figura 73: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas de referências com o traço 1: 2,5.

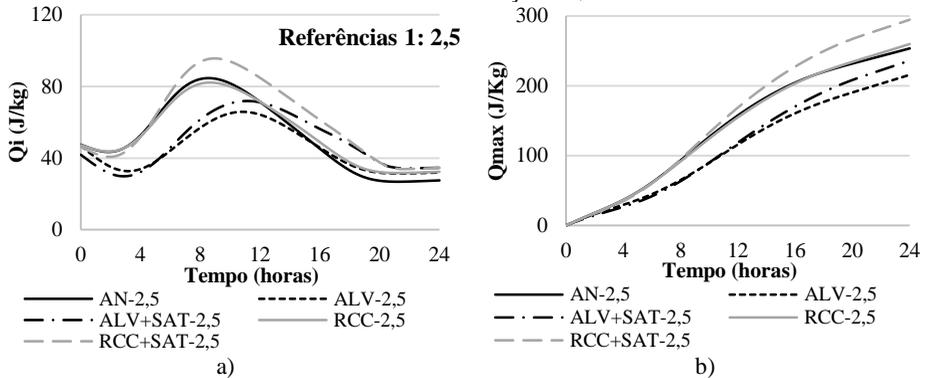
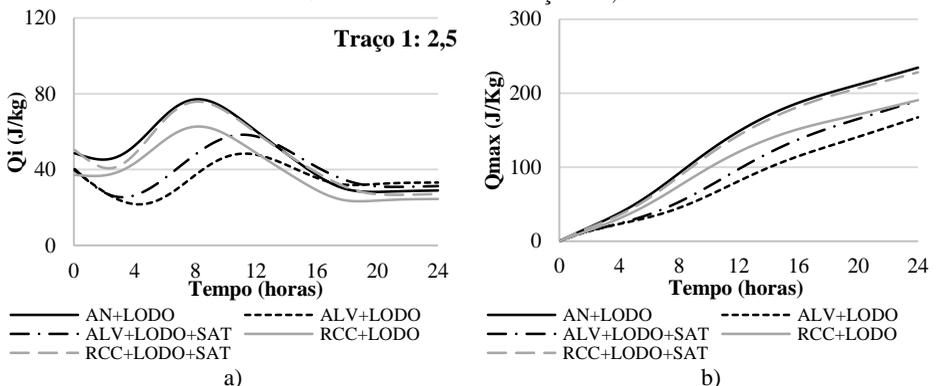
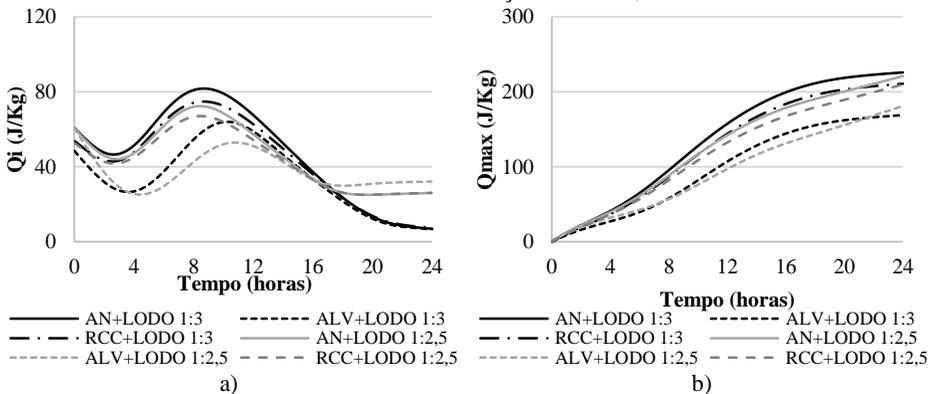


Figura 74: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas com 8,5 % de resíduo com o traço 1: 2,5.



Como comentando anteriormente, a substituição total da água de amassamento pelo resíduo de galvanoplastia apresentou maior influência no traço com maior teor de cimento (1: 2,5) devido à interferência do resíduo com o cimento. Bem como, a influência da utilização do agregado leve, no traço 1: 3 foi menos pronunciada (Figura 75).

Figura 75: Curvas da evolução do calor de hidratação das argamassas com 100 % de resíduo com o traço 1: 3 e 1: 2,5.



6.3.1.2 Conclusões parciais

As características das argamassas no estado fresco não foram alteradas pela substituição parcial do agregado natural pelo agregado reciclado, nos dois traços, uma vez que essas amostras apresentaram características semelhantes às argamassas de referência com apenas agregado natural. Bem como, a presença de 8,5 % de resíduo de galvanoplastia não alterou as características das amostras. Já, a substituição parcial do agregado natural por agregado leve alterou as propriedades do material final, devido, principalmente, às características do agregado e não do teor de resíduo.

Quando substituído à água de amassamento por 100 % de resíduo de galvanoplastia, na composição 1: 3, alteraram algumas propriedades das argamassas no estado fresco, como redução da massa específica, trabalhabilidade, consumo de cimento e aumento do teor de ar incorporado. Entretanto, a redução do consumo de cimento é uma característica apreciável, já a redução da trabalhabilidade pode trazer prejuízos, dependendo da finalidade. Essas alterações nas características das amostras foram causadas, também, em todas as argamassas com substituição parcial do agregado natural pelo agregado leve.

A utilização do agregado reciclado ou leve como sorvente químico no processo de solidificação/ estabilização em argamassas é influenciado pelo traço utilizado. Uma vez que, quando utilizado o traço 1: 3, as alterações na hidratação das argamassas foram inferiores às argamassas com o traço 1: 2,5 pois, na composição mais rica, tem-se um maior teor de cimento para interagir com o resíduo. Porém, mesmo quando utilizado 100 % de resíduo de galvanoplastia, não houve influência significativa nas características finais da hidratação.

Assim, pode-se concluir que o descarte do resíduo de galvanoplastia em argamassas com agregados leves e reciclados como sorvente químico é eficaz. Contudo, é necessário analisar o estado endurecido para verificar a influência do resíduo ao longo do tempo.

6.3.2 Lodo solidificado

Os resultados das propriedades físicas e das propriedades mecânicas das diferentes misturas de lodo solidificado encontram-se no APÊNDICE 3.

Os resultados de massa específica ficaram entre 1,86 e 2,34 g/cm³, de porosidade aberta entre 15,1 e 22,1 % e absorção por imersão ficaram entre 7,0 e 12,8 %.

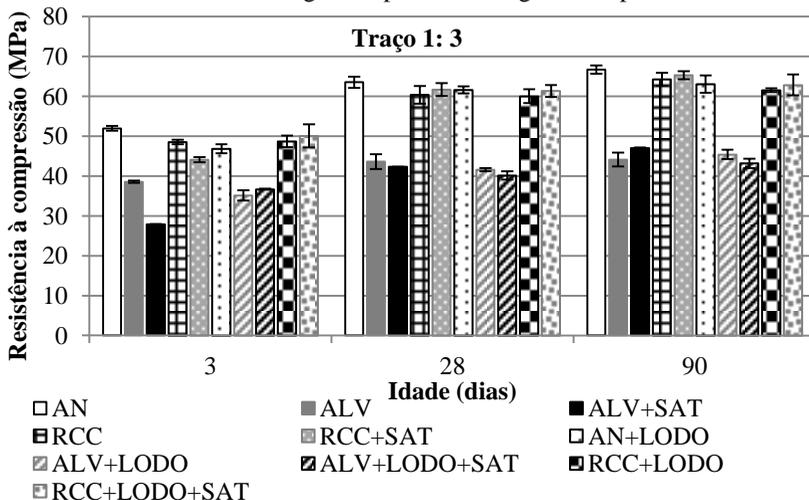
De acordo com a análise de variância ANOVA, com 95 % de confiabilidade, pode-se afirmar que a substituição de 8,5 % de lodo não afetou significativamente os resultados de resistência mecânica. A porosidade do material levou a redução da resistência das argamassas, ou seja, a redução da resistência foi decidida pela redução da resistência dos materiais porosos (APÊNDICE 4).

6.3.2.1 Resistência à compressão

As argamassas produzidas neste estudo cumprem com os valores de resistência à compressão de todos os protocolos para validação do processo de S/E para descarte do material em aterro sanitário e para utilização em blocos de concreto, com resistências superiores as exigidas (Protocolo do Canadá (1991) resistência mínima para a viabilidade do processo de S/E 0,35 MPa; EPA (2001) considera o mesmo valor para descarte do material em aterro sanitário; Agência ambiental da Europa (2010) determina que os resíduos monolíticos para serem aceitos em aterros devem apresentar 1 MPa; ASTM C-90 (2012) 13 MPa para utilização em blocos de concreto).

Nas argamassas com o traço 1: 3, a maior resistência em todas as idades foi para a REF-AN. Na Figura 76 verifica-se o aumento expressivo da resistência da argamassa ALV+SAT de 3 para 90 dias, uma vez que com 3 dias a resistência foi 28 % inferior à argamassa ALV e, com 90 dias a argamassa ALV+SAT apresentou aumento de 7 % de resistência em relação à argamassa ALV. Estando, assim, clara a eficiência da saturação prévia do agregado para a cura interna.

Figura 76: Resistência à compressão das amostras com o traço 1: 3 e com 8,5 % de resíduo de galvanoplastia ao longo do tempo.



Na Figura 77 verificou-se que a resistência das argamassas com 3 dias são praticamente iguais (entre as argamassas com agregado reciclado e as argamassas com apenas agregado natural). Do mesmo modo que, com 28 e 90 dias, houve aumento da resistência pela incorporação do agregado saturado. Ou seja, quando o agregado foi adicionado saturado, auxiliou para a melhora da hidratação nas idades posteriores, enquanto que quando o agregado foi utilizado seco previamente, auxiliou na melhora da hidratação nas idades iniciais.

As argamassas com 100 % de resíduo de galvanoplastia apresentaram, em todos os casos, resistências superiores a 30 MPa. Assim como, a utilização do traço com maior teor de cimento aumentou a resistência apenas com 90 dias de hidratação (Figura 78).

Figura 77: Resistência à compressão das amostras com o traço 1: 2,5 e com 8,5 % de resíduo de galvanoplastia ao longo do tempo.

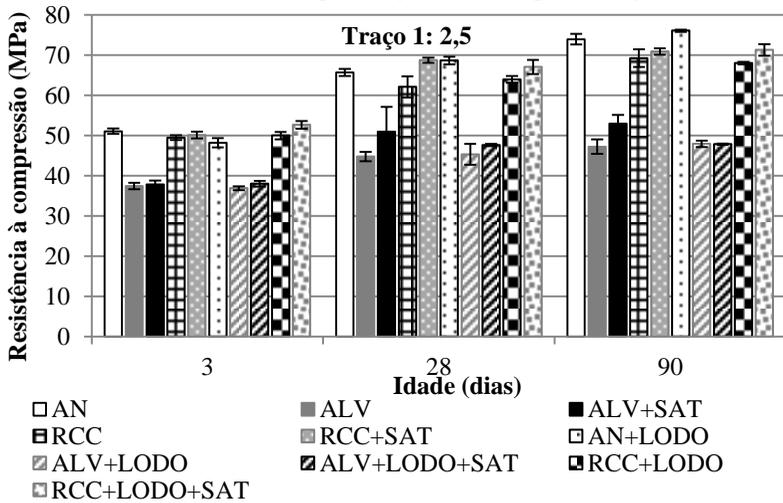
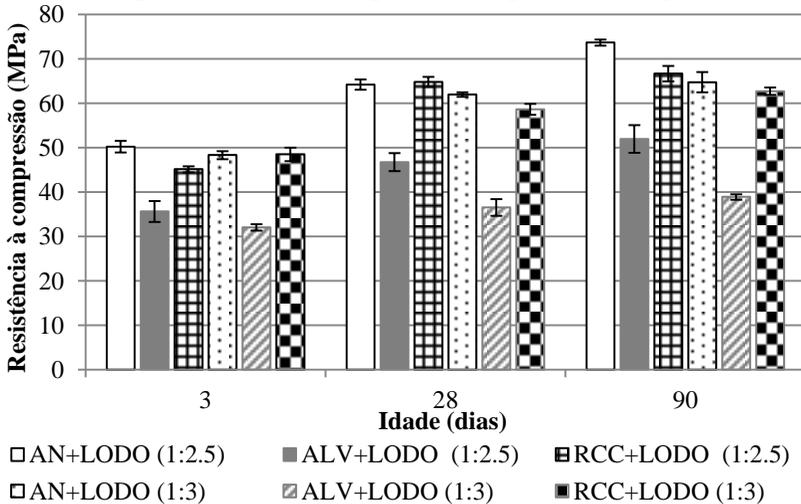


Figura 78: Resistência à compressão das amostras com 100 % de resíduo de galvanoplastia ao longo do tempo, com o respectivo desvio padrão.



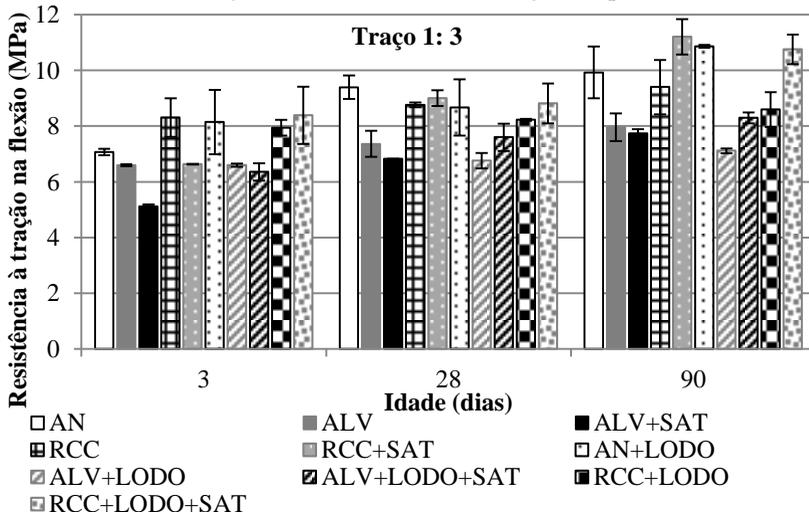
6.3.2.2 Resistência à tração na flexão

A molhagem prévia apresentou, em todos os casos, um aumento proporcional da resistência ao longo do tempo superior as amostras sem molhagem prévia, devido à disponibilidade de água para cura interna, a qual auxilia para a melhora da zona de transição interfacial com mais produtos hidratados e, conseqüentemente, reforça a resistência à tração na flexão, uma vez que, as fissuras presentes na ZTI influenciam diretamente na resistência à tração na flexão.

As argamassas produzidas com substituição parcial (25 %) do agregado natural por agregado reciclado apresentaram resistências à tração na flexão compatíveis com as argamassas com apenas agregado natural, nos dois traços. A substituição parcial da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia, nos dois traços, não influenciou na resistência à tração na flexão das argamassas.

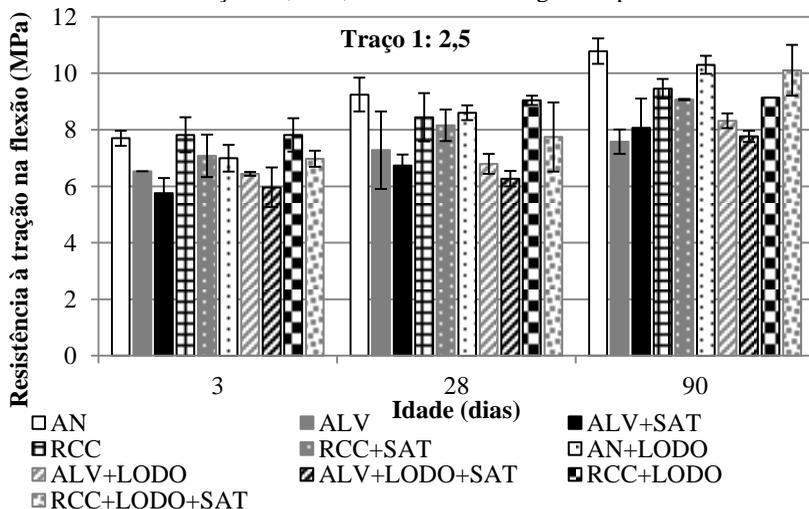
As amostras com 28 e 90 dias, traço 1: 3 e realização de molhagem prévia dos agregados apresentaram tendência em aumentar a resistência, em comparação com as argamassas sem molhagem prévia, com exceção para as argamassas com agregado leve e sem a presença de resíduo de galvanoplastia (Figura 79).

Figura 79: Resistência à tração na flexão ao longo do tempo das argamassas com o traço 1: 3 e 8,5 % de resíduo de galvanoplastia.



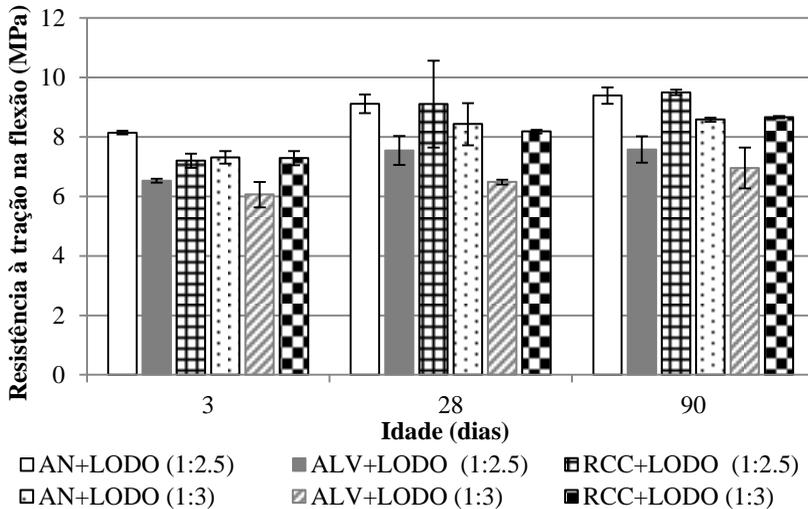
Nas argamassas com o traço 1: 2,5, a molhagem prévia dos agregados não alterou a resistência à tração na flexão. Assim como, a substituição parcial da água de amassamento por resíduo não afetou significativamente os resultados, os quais apresentaram maior impacto pela origem do agregado que pela utilização do resíduo (Figura 80).

Figura 80: Resistência à tração na flexão ao longo do tempo das argamassas com o traço 1: 2,5 e 8,5 % de resíduo de galvanoplastia.



A resistência das argamassas com 3 dias de hidratação não foi influenciada pelo traço utilizado ou pelo agregado. Entretanto, com 28 e 90 dias as resistências das argamassas foram afetadas pelo traço e pelo agregado. A substituição total da água de amassamento pelo resíduo de galvanoplastia não alterou significativamente a resistência das argamassas (Figura 81).

Figura 81: Resistência à tração na flexão ao longo do tempo das argamassas com 100 % de resíduo de galvanoplastia.



6.3.2.3 Variação dimensional

O ensaio de variação dimensional das argamassas foi verificado conforme a NBR 15261. A partir dos dados experimentais foram adicionadas linhas de tendência e gerado a equação da curva e o R^2 , que estão dispostos na Tabela 59. Com as equações calculou-se a variação dimensional das amostras, para as idades de 3, 7, 28 e 120 dias. Sendo que, quando os valores são negativos a amostra retraiu e quando os valores são positivos a amostra expandiu.

De modo geral, a incorporação de resíduo (8,5 e 100 %) aumentaram a retração/ expansão das amostras, mas não significativamente. Assim como, a molhagem prévia dos agregados auxiliou para a redução da variação dimensional, uma vez que a cura interna fornecida nas primeiras idades por esses agregados auxiliou para um período prolongado com 100 % de umidade relativa e, conseqüentemente, auxiliou para a redução da retração por secagem, com exceção da RCC+SAT 1: 2,5. Esse aumento da retração ocorreu pela maior necessidade de água em menor tempo, pois foi à amostra que apresentou o maior grau de hidratação, verificado no ensaio de calor de hidratação (Tabela 59).

Tabela 59: Equação da curva e r^2 do ensaio de variação dimensional.

	Material/ Argamassas	R ²	Equação da curva	Variação dimensional (mm/m)				
				3 dias	7 dias	28 dias	120 dias	
8,5 % DE LODO	TRAÇO 1 : 3	REF-AN	0,801	$y = -0,022\ln(x)-0,0089$	-0,033	-0,052	-0,082	-0,114
		REF-ALV	0,600	$y = 0,0005x - 0,0277$	-0,026	-0,024	-0,014	0,032
		ALV + SAT	0,955	$y = 0,0285\ln(x)+0,0082$	0,040	0,064	0,103	0,145
		REF-RCC	0,831	$y = -0,019\ln(x)-0,0078$	-0,029	-0,045	-0,071	-0,099
		RCC + SAT	0,727	$y = -0,016\ln(x)-0,0045$	-0,022	-0,036	-0,058	-0,081
		AN + LODO	0,826	$y = -0,025\ln(x)-0,0111$	-0,039	-0,060	-0,094	-0,131
	ALV + LODO	0,739	$y = 0,0007x - 0,0155$	-0,013	-0,011	0,004	0,069	
	ALV+LODO+SAT	0,888	$y = 0,0007x + 0,0242$	0,026	0,029	0,044	0,108	
	RCC + LODO	0,649	$y = -0,017\ln(x)-0,0124$	-0,031	-0,045	-0,069	-0,094	
	RCC+LODO+SAT	0,754	$y = -0,02\ln(x) + 0,0004$	-0,022	-0,039	-0,066	-0,095	
	REF-AN	0,901	$y = -0,044\ln(x)-0,0344$	-0,083	-0,120	-0,181	-0,245	
	REF-ALV	0,535	$y = 0,0075\ln(x)-0,0006$	0,008	0,014	0,024	0,035	
ALV + SAT	0,811	$y = 0,0207\ln(x)-0,0169$	0,006	0,023	0,052	0,082		
REF-RCC	0,615	$y = -0,018\ln(x)-0,0189$	-0,039	-0,054	-0,079	-0,105		
RCC + SAT	0,766	$y = -0,047\ln(x)-0,0784$	-0,130	-0,170	-0,235	-0,303		
AN + LODO	0,851	$y = -0,054\ln(x)-0,0581$	-0,117	-0,163	-0,238	-0,317		
ALV + LODO	0,821	$y = -0,036\ln(x)-0,0355$	-0,075	-0,106	-0,155	-0,208		
ALV+LODO+SAT	0,828	$y = 0,0214\ln(x)-0,0012$	0,022	0,040	0,070	0,101		
RCC + LODO	0,758	$y = -0,037\ln(x)-0,0414$	-0,082	-0,113	-0,165	-0,219		
RCC+LODO+SAT	0,598	$y = -0,025\ln(x)-0,0485$	-0,076	-0,097	-0,132	-0,168		
100% LODO	1 : 3	AN + LODO	0,874	$y = -0,016\ln(x) + 0,0038$	-0,014	-0,027	-0,050	-0,073
		ALV + LODO	0,752	$y = 0,014\ln(x) + 0,0084$	0,024	0,036	0,055	0,075
		RCC + LODO	0,846	$y = -0,016\ln(x)-0,0072$	-0,025	-0,038	-0,061	-0,084
	1:2,5	AN + LODO	0,882	$y = -0,023\ln(x)-0,0103$	-0,036	-0,055	-0,087	-0,120
		ALV + LODO	0,923	$y = 0,0204\ln(x)-0,0008$	0,022	0,039	0,067	0,097
		RCC + LODO	0,759	$y = -0,031\ln(x)-0,0497$	-0,084	-0,110	-0,153	-0,198

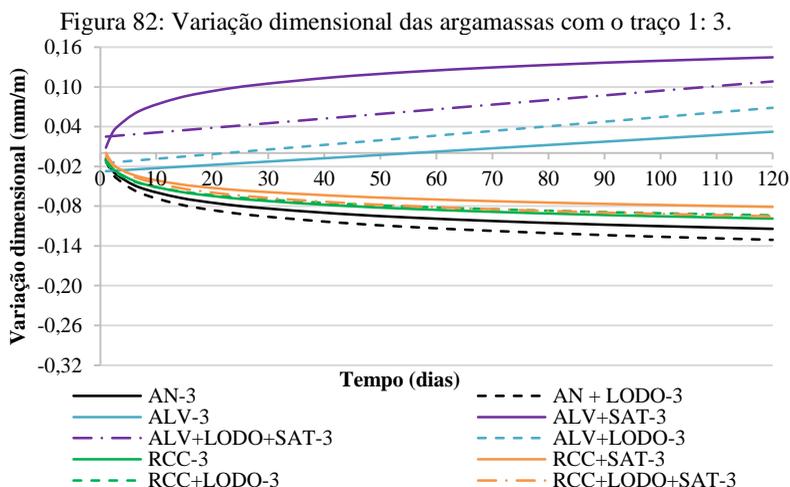
Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; LODO = resíduo de galvanoplastia.

As argamassas com 100 % de resíduo de galvanoplastia, no traço 1: 3, não apresentaram alteração significativa na retração/ expansão das argamassas quando comparadas com as argamassas produzidas com 8,5 % de resíduo. Já, nas argamassas com 100 % de resíduo com o traço 1: 2,5 reduziram a retração das argamassas quando comparada com as argamassas com 8,5 % de resíduo (Tabela 59).

Com a equação da curva foram geradas as curvas da variação dimensional de cada amostra, apresentadas na Figura 82, Figura 83 e Figura 84. Pela Figura 82 nota-se que as amostras produzidas com 8,5 % de substituição da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia e traço 1: 3, em todas as amostras com agregado leve, apresentaram tendência de expandir (valores positivos), enquanto as amostras com agregado reciclado e nas amostras com apenas agregado natural, retraíram (valores negativos). Isso foi atribuído à presença de sulfato no agregado leve, uma vez que o sulfato pode reagir com aluminato tricálcico e com

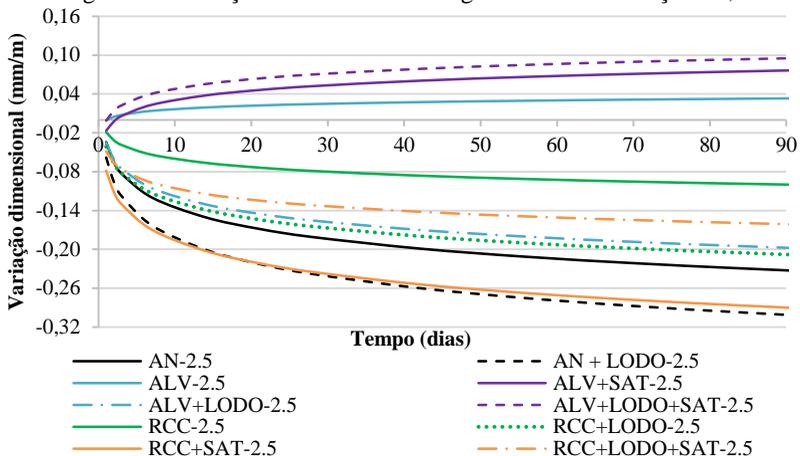
hidróxido de cálcio formando compostos expansivos, corroborando com o ensaio de calor de hidratação, no qual as argamassas com agregado leve retardaram o início da hidratação. Bem como, a expansão das argamassas pode ser resultado da maior capacidade de absorção do agregado, o que acarreta em uma pressão hidrostática interna que, por sua vez, leva a expansão (KWAN *et al.*, 2012).

As amostras com agregado reciclado apresentaram redução da retração, em comparação com a REF-AN. Bem como, em todas as amostras com o traço 1: 3 e 8,5 % de resíduo de galvanoplastia, o resíduo não influenciou na variação dimensional.



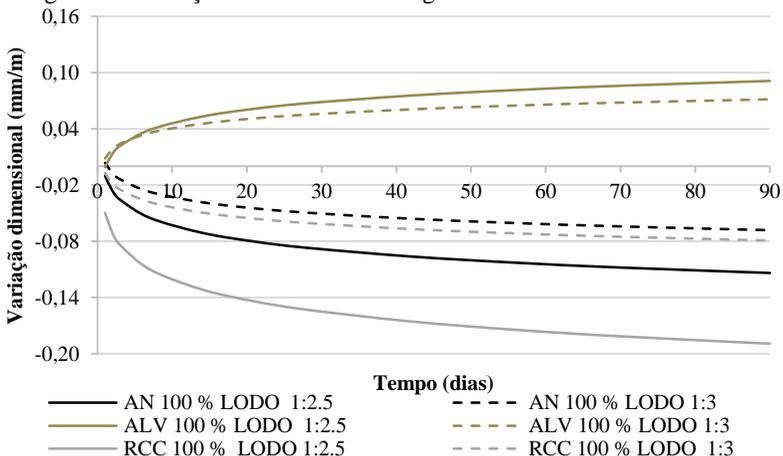
Na Figura 83 são apresentados os resultados da variação dimensional das amostras com 8,5 % de resíduo de galvanoplastia com o traço 1: 2,5. A amostra com menor retração foi à amostra com agregado reciclado (REF-RCC) e as maiores retrações foram obtidas nas amostras RCC+SAT e AN+LODO, devido ao maior teor de cimento. Assim como, as amostras com agregado leve apresentaram a mesma tendência com o traço 1: 3, expandiram-se. A incorporação do resíduo de galvanoplastia apresentou maior influencia nessas argamassas, devido ao maior teor de cimento, conforme também verificado no ensaio de calor de hidratação.

Figura 83: Variação dimensional das argamassas com o traço 1: 2,5.



Na Figura 84 são apresentados os resultados da variação dimensional para as amostras com substituição total da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia, nas duas composições estudadas (1: 3 e 1: 2,5). Conforme verificado, com 8,5 % de resíduo, as amostras com agregado leve expandiram enquanto que as amostras com agregado reciclado e com apenas agregado natural retraíram. Do mesmo modo, fica nítida a maior influencia do resíduo de galvanoplastia nas amostras com maior teor de cimento (1: 2,5) pela maior influência na variação dimensional das amostras.

Figura 84: Variação dimensional das argamassas com 100 % de resíduo.



6.3.2.4 Compatibilidade ambiental

6.3.2.4.1 Ensaio de tanque

Na Tabela 60 são apresentados os resultados da análise química dos lixiviados acumulados após os 64 dias do ensaio de tanque nas amostras monolíticas. A presença dos metais pesados no lixiviado das argamassas de referência (REF-AN, REF-ALV e REF-RCC) foi oriunda dos agregados e do cimento utilizado.

Com base nos valores de resíduos adicionados nas argamassas e nos valores lixiviados, pode-se concluir que o resíduo foi retido no interior dos agregados ou nos produtos hidratados do cimento, uma vez que houve liberação dos metais pesados nas argamassas de referência também. Essa eficiência foi devido à estabilização química. Com os metais pesados sendo incorporados, sorvidos ou substituíram algum metal como o silício, o cálcio ou o alumínio na formação da matriz de silicato de cálcio hidratada e/ou na etringita. Corroborando com os resultados de Cioffi, Lavorgna e Santoro (2002).

Tabela 60: Liberação acumulada das 8 extrações do ensaio de tanque, em mg/L.

	Material/ Argamassas	Ba	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Zn	
8,5 % DE LODO	TRAÇO 1:3	REF-AN	531,7	<LD	5,5	74,0	<LD	19,2	279,3
		REF-ALV	585,9	<LD	28,5	63,0	<LD	23,5	303,3
		REF-RCC	442,9	<LD	7,0	66,1	<LD	18,3	277,0
	AN + LODO	500,7	<LD	<LD	64,8	<LD	14,9	266,2	
	ALV + LODO	466,9	<LD	12,9	60,2	<LD	17,0	292,2	
	ALV+LODO+SAT	605,8	<LD	<LD	72,2	<LD	19,4	277,4	
	RCC + LODO	713,3	<LD	20,1	95,3	<LD	23,7	327,6	
	RCC+LODO+SAT	682,9	<LD	5,9	100,2	<LD	19,0	288,8	
	TRAÇO 1:2,5	AN + LODO	690,8	<LD	<LD	96,1	44,9	7,9	262,3
		ALV + LODO	557,7	<LD	11,2	75,4	<LD	7,6	245,0
ALV+LODO+SAT		724,9	<LD	71,4	98,2	<LD	8,2	291,4	
RCC + LODO		675,1	<LD	<LD	100,3	<LD	4,2	233,6	
RCC+LODO+SAT		765,4	<LD	<LD	108,3	<LD	4,6	230,3	
100% LODO	1:3	AN + LODO	579,0	18,4	<LD	85,1	<LD	5,4	209,2
		ALV + LODO	556,9	<LD	<LD	77,5	<LD	1,4	194,9
		RCC + LODO	542,3	12,6	59,8	79,0	<LD	1,1	187,1
	1:2,5	AN + LODO	573,9	<LD	6,1	90,1	<LD	1,1	175,8
		ALV + LODO	506,5	<LD	13,0	67,6	22,8	1,0	214,0
		RCC + LODO	513,0	<LD	<LD	72,5	<LD	2,0	196,4

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; LODO = resíduo de galvanoplastia; <L.D. = inferior ao limite de detecção do equipamento.

A alta retenção dos metais pesados, observada na Tabela 61, está relacionada, também, com a baixa porosidade das argamassas, uma vez que, todas apresentaram porosidade inferior a 20 %. Estando de acordo com Reyes *et al.* (2011) aonde constataram que o desempenho dos materiais tratados pelo processo de S/E é influenciado pela porosidade do material.

Tabela 61: Retenção dos metais pesados de interesse pelas argamassas.

Argamassas		Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
8,5 % DE LODO	REF-AN	-	-	-	-	-
	REF-ALV	100 %	80,9 %	100 %	89,3 %	61,1 %
	REF-RCC	100 %	98,8 %	100 %	100 %	100 %
	TRAÇO 1 : 3					
	AN + LODO	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	ALV + LODO	100 %	93,9 %	100 %	100 %	79,1 %
	ALV+LODO+SAT	100 %	100 %	100 %	99,5 %	100 %
	RCC + LODO	100 %	87,9 %	100 %	88,8 %	21,7 %
	RCC+LODO+SAT	100 %	99,7 %	100 %	100 %	84,6 %
	TRAÇO 1:2,5					
AN + LODO	100 %	100 %	91,0 %	100 %	100 %	
ALV + LODO	100 %	95,3 %	100 %	100 %	100 %	
ALV+LODO+SAT	100 %	45,3 %	100 %	100 %	80,4 %	
RCC + LODO	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	
RCC+LODO+SAT	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	
100% LODO	TRAÇO 1 : 3					
	AN + LODO	95,5 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	ALV + LODO	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	RCC + LODO	96,9 %	54,9 %	100 %	100 %	100 %
	TRAÇO 1:2,5					
	AN + LODO	100 %	99,5 %	100 %	100 %	100 %
ALV + LODO	100 %	93,8 %	95,4 %	100 %	100 %	
RCC + LODO	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; LODO = resíduo de galvanoplastia.

Os resultados da condutividade elétrica e do pH do líquido lixiviante após cada extração do ensaio de tanque são apresentados no APÊNDICE 3. Os valores de condutividade elétrica variaram de 925 a 3025 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e de pH ficaram entre 11,5 e 12,1.

6.3.2.4.2 Ensaio de conformidade

Na Tabela 62 são apresentados os resultados do ensaio de conformidade, o qual é realizado com água destilada e a argamassa no estado granular inferior a 9,5 mm. A lixiviação foi extremamente baixa quando utilizado 8,5 % do resíduo na produção das argamassas, apresentando concentrações abaixo do limite de detecção do equipamento para o cromo, chumbo e fluoreto (F). Nas argamassas com 8,5 % de

resíduo, as maiores liberações foram de cloretos e sulfatos, sendo que esses elementos já estavam presentes nos agregados, conforme verificado na caracterização química dos agregados. Nas argamassas preparadas com 100 % de resíduo, a maior liberação foi do bário.

Tabela 62: Concentração dos elementos lixiviados (mg/L).

Argamassas		Ba	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Zn	Cl	SO ₄ ²⁻	
8,5 % DE LODO	TRAÇO 1 : 3	REF-AN	0,95	<LD	0,02	0,06	0,04	<LD	0,04	2,89	4,13
		REF-ALV	1,09	<LD	0,01	0,06	0,04	<LD	0,03	3,53	4,05
		ALV + SAT	1,33	<LD	<LD	0,05	0,04	<LD	0,02	3,51	2,21
		REF-RCC	0,98	<LD	0,01	0,06	0,04	<LD	0,03	3,05	3,74
		RCC + SAT	1,12	<LD	<LD	0,05	0,04	<LD	0,02	3,02	2,40
	AN + LODO	1,21	<LD	0,01	0,05	0,04	<LD	0,03	3,36	2,95	
	ALV + LODO	1,09	<LD	<LD	0,06	0,04	<LD	0,03	3,95	3,99	
	ALV+LODO+SAT	1,30	<LD	<LD	0,05	0,04	<LD	0,02	3,86	2,30	
	RCC + LODO	0,93	<LD	<LD	0,06	0,04	<LD	0,02	3,39	4,01	
	RCC+LODO+SAT	1,11	<LD	<LD	0,05	0,04	<LD	0,03	3,37	2,49	
8,5 % DE LODO	TRAÇO 1 : 2,5	REF-AN	1,45	<LD	0,01	0,04	0,04	<LD	0,04	3,05	2,07
		REF-ALV	1,52	<LD	<LD	0,05	0,04	<LD	0,03	3,65	2,68
		ALV + SAT	1,29	<LD	<LD	0,05	<LD	<LD	0,05	3,83	4,32
		REF-RCC	1,32	<LD	0,01	0,05	0,04	<LD	0,04	3,45	2,94
		RCC + SAT	1,19	<LD	<LD	0,04	<LD	<LD	0,06	3,36	3,55
	AN + LODO	1,29	<LD	0,01	0,05	0,04	<LD	0,03	3,21	2,64	
	ALV + LODO	1,46	<LD	0,01	0,05	0,04	<LD	0,03	4,24	3,19	
	ALV+LODO+SAT	1,17	<LD	<LD	0,06	<LD	<LD	0,03	4,46	4,33	
	RCC + LODO	1,38	<LD	0,01	0,05	0,04	<LD	0,04	3,95	2,71	
	RCC+LODO+SAT	1,02	<LD	<LD	0,05	<LD	<LD	0,03	4,14	3,45	
100% LODO	1 : 3	AN + LODO	1171,9	40,5	16,4	53,7	11,2	4,8	37,2	6,18	3,22
		ALV + LODO	1137,7	39,3	14,6	56,0	<LD	4,8	27,0	7,15	3,05
		RCC + LODO	1031,0	47,8	16,2	55,0	15,1	4,9	28,0	6,32	2,36
	1:2,5	AN + LODO	1286,6	<LD	16,6	48,9	<LD	4,8	24,0	7,08	6,33
		ALV + LODO	1263,2	11,1	17,8	52,3	<LD	5,3	26,5	7,86	2,31
		RCC + LODO	1166,1	<LD	15,2	49,2	<LD	4,7	32,9	6,86	2,90

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; LODO = resíduo de galvanoplastia; <L.D. = inferior ao limite de detecção do equipamento.

Em relação à diretiva 31 da comunidade europeia, que especifica limites da presença dos metais pesados para o resíduo ser admitido em aterros sanitários, as argamassas produzidas podem ser admissíveis como materiais inertes, uma vez que encontram-se praticamente todas abaixo dos limites estipulados (com exceção para algumas argamassas aonde a presença do molibdênio e o níquel foi ligeiramente superior ao limite que é, respectivamente, 0,5 e 0,4 mg/L, sendo essas classificadas como resíduo não perigoso). Entretanto, a argamassa REF-AN apresentou um teor superior ao limite de molibdênio e praticamente o limite do

teor de níquel, considerando que a argamassa de referência é inerte, todas as argamassas produzidas com 8,5 % de resíduo de galvanoplastia também são consideradas inertes (Tabela 62). O mesmo aconteceu quando comparado os limites lixiviados com os valores admissíveis para a água ser considerada potável para a portaria federal MS nº 2914 de 2011. Já, em relação à norma brasileira NBR 10004, todos os valores lixiviados são inferiores ao admitido e, por isso, considerados não tóxicos.

Já, as argamassas preparadas com 100 % de resíduo são todas classificadas como resíduo perigoso, pois liberaram valores superiores ao especificado pela norma europeia, em praticamente todos os metais. Assim como, para a norma brasileira NBR 10004, os limites lixiviados estão acima do máximo permitido, sendo classificadas como tóxicas (Tabela 62).

As argamassas com 8,5 % de resíduo de galvanoplastia apresentaram 100 % de retenção para o cromo, cobre, níquel, chumbo e zinco em suas estruturas. Esses metais foram escolhidos para verificar a retenção, pois foram esses os metais analisados no resíduo de galvanoplastia puro. Do mesmo modo, o traço com maior teor de cimento (1: 2,5) apresentou o maior potencial de retenção, quando utilizado 100 % de resíduo de galvanoplastia. Ou seja, os metais pesados ficaram retidos na estrutura interna da pasta de cimento, em poros fechados, nos produtos de hidratação do cimento ou no interior do agregado utilizado. O cromo com o traço 1: 2,5 apresentou uma retenção superior a 97 % em todos os casos e com o traço 1: 3, uma retenção superior a 88,2 % (Tabela 63).

Tabela 63: Retenção do resíduo de galvanoplastia pelas argamassas.

Argamassas		Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
8,5 % DE LODO	REF-AN	-	-	-	-	-
	REF-ALV	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	ALV + SAT	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	REF-RCC	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	RCC + SAT	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	AN + LODO	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	ALV + LODO	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	ALV+LODO+SAT	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	RCC + LODO	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	RCC+LODO+SAT	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	REF-AN	-	-	-	-	-
	REF-ALV	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	ALV + SAT	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	REF-RCC	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	RCC + SAT	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
TRAÇO 1 : 2,5	AN + LODO	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	ALV + LODO	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	ALV+LODO+SAT	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	RCC + LODO	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	RCC+LODO+SAT	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	100% LODO	AN + LODO	90,0 %	86,4 %	97,8	88,0 %
ALV + LODO		90,3 %	87,9 %	100 %	88,0 %	56,3 %
RCC + LODO		88,2 %	86,6 %	97,0	87,8 %	54,7 %
AN + LODO		100 %	86,2 %	100 %	88,0 %	61,2 %
ALV + LODO		97,3 %	85,2 %	100 %	86,8 %	57,1 %
RCC + LODO		100 %	87,4 %	100 %	88,3 %	46,7 %

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; LODO = resíduo de galvanoplastia.

Conforme se observa na Tabela 64, o pH de todas as amostras está em torno de 12, ou seja alcalino. Quanto menor o pH das argamassas, menor foi a liberação de hidróxido de cálcio, uma vez que o caráter básico das soluções está ligado à liberação de hidróxido de cálcio das argamassas. Já, as condutividades elétricas das argamassas ficaram entre 9,5 e 10,6 mS/cm. Sendo que condutividade elétrica está diretamente relacionada com a solubilidade de sais ou outros compostos no líquido lixiviado, ou seja, quanto maior o teor de íons no líquido lixiviado, maior será a condutividade elétrica.

Tabela 64: pH e condutividade elétrica do líquido lixiviante após o ensaio de conformidade.

	Argamassas	pH	C.E.		Argamassas	pH	C.E.	
8,5 % DE LODO	TRAÇO 1 : 3	REF-AN	12,45	10,135	TRAÇO 1 : 2,5	REF-AN	12,66	9,922
		REF-ALV	12,57	10,060		REF-ALV	12,69	9,775
		ALV + SAT	12,58	10,580		ALV + SAT	12,64	9,693
		REF-RCC	12,48	10,040		REF-RCC	12,69	9,543
		RCC + SAT	12,58	10,175		RCC + SAT	12,66	9,767
		AN + LODO	12,59	10,395		AN + LODO	12,70	9,620
		ALV + LODO	12,49	10,085		ALV + LODO	12,71	9,763
		ALV+LODO+SAT	12,59	10,460		ALV+LODO+SAT	12,67	9,588
		RCC + LODO	12,48	9,850		RCC + LODO	12,70	9,542
		RCC+LODO+SAT	12,59	10,170		RCC+LODO+SAT	12,68	9,872
100% LODO	1 : 3	AN + LODO	12,82	9,972	1 : 2,5	AN + LODO	12,65	10,522
		ALV + LODO	12,84	9,827		ALV + LODO	12,66	10,350
		RCC + LODO	12,84	9,870		RCC + LODO	12,68	10,397

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; LODO = resíduo de galvanoplastia; C.E.= Condutividade elétrica (mS/cm).

6.3.2.5 Microscopia eletrônica de varredura

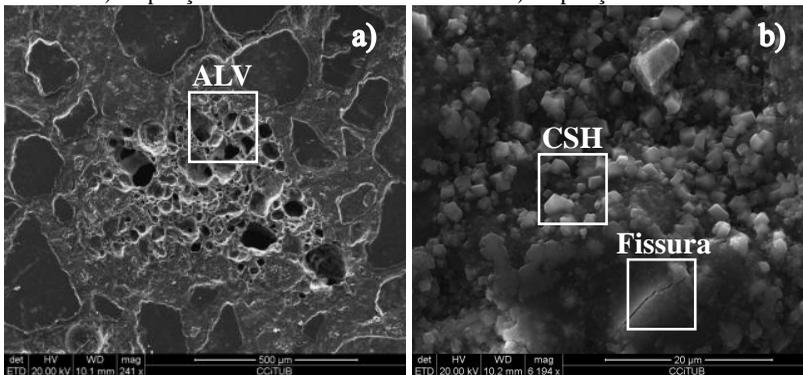
Nas amostras com o traço 1: 3 com 8,5 % de substituição da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia, com realização da molhagem prévia dos agregados leve e reciclado e com 3 dias de hidratação, foram realizadas imagens de micrografia eletrônica de varredura.

Na Figura 85-a) verificou-se a presença de um grão do agregado leve, ao redor do grão, não houve presença da zona de transição interfacial. Foi difícil identificar os limites do agregado, como também tem-se a pasta de cimento distribuída de forma uniforme por toda a argamassa, corroborando com Sun *et al.* (2015). Na Figura 85-b) foi observada a presença de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Figura 85: Imagens de MEV da argamassa com agregado leve com molhagem prévia com o traço 1: 3 e 8,5 % de resíduo de galvanoplastia.

a) ampliação de 240x

b) ampliação de 6200x

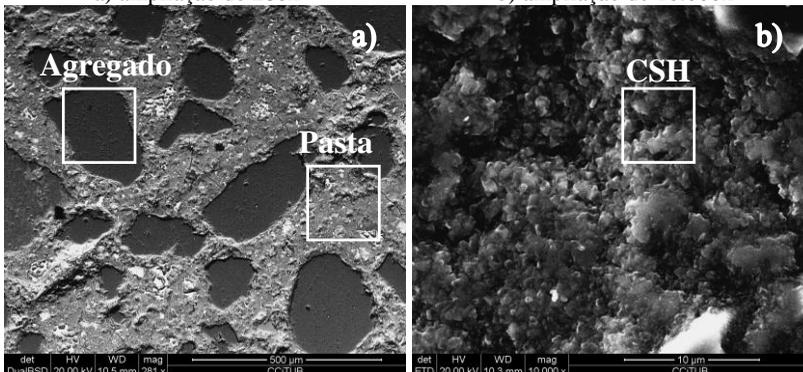


Nas Figura 86-a) foi verificada a presença de agregados, porém não foi possível afirmar se são agregados reciclados ou agregados naturais, uma vez que, o agregado reciclado é o agregado natural envolto de pasta de cimento. A argamassa possui estrutura densa, sem presença de zona transição interfacial ao redor dos grãos, pela melhora causada devido ao uso do agregado reciclado saturado previamente. Assim como, na Figura 86-b) tem-se uma imagem mais aproximada da estrutura do agregado, na qual verificou-se a presença de C-S-H.

Figura 86: Imagens de MEV da argamassa com agregado reciclado com molhagem prévia com o traço 1: 3 e 8,5 % de resíduo de galvanoplastia.

a) ampliação de 280x

b) ampliação de 10.000x



6.3.2.6 Conclusões parciais

As conclusões obtidas a partir da caracterização das argamassas com 8,5 e 100 % de substituição da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia no estado endurecido são as seguintes:

- Os resultados de massa específica, porosidade aberta e absorção por imersão das argamassas no estado endurecido não foram influenciados pela incorporação de 8,5 % de lodo e pela saturação prévia dos agregados. Sendo influenciadas pela substituição parcial do agregado natural por agregado leve (com aumento da absorção e redução da massa específica, devido às características iniciais dos grãos dos agregados). As porosidades em todas as argamassas ficaram praticamente iguais, não sendo alterada pelo teor de cimento utilizado. Nas argamassas com 100 % de lodo de galvanoplastia a absorção por imersão, nas argamassas com agregado reciclado, não foram influenciadas pelo traço, já, a porosidade aberta foi influenciada apenas no traço 1: 3 pelo material utilizado, que aumentou levemente a porosidade quando utilizado o agregado leve. A absorção e a porosidade aberta das argamassas foram reduzidas quando utilizado 100 % de lodo, isso pode ter ocorrido pela falta de material inferior a 0,15 mm, e o lodo funcionou como fino, preenchendo os espaços vazios.

- Com referência ao ensaio de resistência à compressão: houve uma leve tendência das argamassas com o traço 1: 3, agregado reciclado e realização da saturação prévia em melhorar a resistência, em todas as idades. Entretanto, essa tendência não foi observada nas argamassas com agregado leve. A molhagem prévia dos agregados com o traço 1: 2,5 aumentou levemente as resistências, em todos os casos. As resistências das argamassas com 100 % de resíduo de galvanoplastia em substituição total a água foram afetadas apenas pelo agregado utilizado e não pelo traço. A substituição total da água pelo resíduo reduziu levemente as resistências.

- Em relação ao ensaio de resistência à tração na flexão, a substituição de 8,5 % de lodo não afetou significativamente os resultados. A resistência das argamassas foi influenciada pela porosidade do material utilizado, ou seja, a redução da resistência foi determinada pela resistência dos materiais porosos. Nos resultados de resistência à tração na flexão pode-se avaliar a eficácia da cura interna, uma vez que melhora a zona de transição (a qual foi verificada, também, no MEV a melhora na ZTI, pois, ao redor dos agregados não foi observado uma fase porosa e com poucos produtos de hidratação) e é na resistência à tração na flexão que as fissuras da zona de transição influenciam. Como podem ser ob-

servadas as amostras com 28 e 90 dias das argamassas com o traço 1: 3 e com molhagem prévia apresentaram uma tendência em aumentar a resistência em comparação às argamassas sem molhagem prévia. A incorporação de 100 % de lodo de galvanoplastia não alterou significativamente a resistência à tração na flexão das argamassas, nos dois traços estudados.

- Sobre os ensaios de compatibilidade ambiental: as argamassas, tanto no ensaio de lixiviação - tanque como no ensaio de conformidade apresentaram alta retenção, apresentando altos valores de retenção até mesmo quando substituído 100 % da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia. Isso pode ser explicado pela baixa porosidade das argamassas, que influenciou para a alta retenção dos metais pesados na estrutura das argamassas, bem como a alta eficiência está relacionada com a estabilização química dos metais, com os metais sendo incorporados, sorvidos ou substituírem o cálcio, o silicato, o alumínio ou o enxofre no silicato de cálcio hidratado e/ou na etringita.

Assim sendo, conclui-se que a substituição de 8,5 % de resíduo de galvanoplastia em relação ao teor total de água nas argamassas não causaram efeitos adversos nas propriedades das argamassas. Bem como, a substituição total da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia, também não afetou tão significativamente as argamassas. Sendo esse um futuro promissor para o descarte adequado desse resíduo, não causando efeitos adversos no ambiente. Porém, deve-se ater as características dos resíduos antes da sua utilização.

7 CONCLUSÕES GERAIS

Esta pesquisa mostrou que o agregado reciclado pode ser considerado agente de cura interna eficiente. Como apresenta massa específica e absorção de água semelhante ao agregado natural, à substituição de 25 % do agregado natural por agregado reciclado não acarretou malefícios para as propriedades das argamassas e ainda reduz o consumo de agregado natural. Entretanto, a vantagem mais importante da utilização do agregado reciclado é a promoção da homogeneidade da argamassa curada internamente, uma vez que melhora a zona de transição interfacial. Outra característica importante do agregado reciclado é a sorção química, a qual foi comprovada a sua eficiência quando utilizada no processo de S/E, verificando que o agregado reciclado contribuiu para uma maior retenção dos metais pesados incorporados à argamassa (absorvendo/ adsorvendo, praticamente, 100 % do chumbo e do zinco e 15 % do cromo devido ao seu pH elevado).

O agregado reciclado apresentou uma maior quantidade de micro poros na sua superfície e com isso teve uma maior área superficial que auxiliou na maior adsorção dos agregados. Já, os agregados leves, são mais porosos com uma maior quantidade de macro poros na superfície e possuem uma maior capacidade de absorção e dessorção. Os dois agregados conseguem liberar a água do seu interior em altas umidades relativas (96 %), com o agregado leve conseguindo liberar praticamente 100 % da água. Enquanto que, o agregado reciclado, libera na faixa de 50 a 70 %. Consequentemente, a água dos agregados porosos estará disponível para a hidratação da pasta de cimento nas primeiras idades.

A substituição parcial do agregado natural por agregado leve ou agregado reciclado foi eficaz para manter as condições de umidade e para fornecer água para as reações de hidratação do cimento. Auxiliando para uma menor porosidade, permeabilidade e absorção, melhora da zona de transição a ponto de não ser distinguida a ZTI e a pasta de cimento e consequentemente uma maior durabilidade.

As características das argamassas no estado fresco não foram alteradas pela substituição parcial do agregado natural por agregado reciclado, uma vez que essas amostras apresentaram características semelhantes às argamassas de referência com apenas agregado natural. Já a substituição parcial do agregado natural por agregado leve alterou as propriedades (massa específica, calor de hidratação, teor de ar incorporado, consumo de cimento e trabalhabilidade), entretanto apenas uma característica relevante foi alterada no estado fresco e que pode ser um malefício que é a redução da trabalhabilidade.

Em relação a hidratação das argamassas, verificou-se que a argamassa que teve o tempo de maior retardo na hidratação, foi a argamassas com agregado leve com incorporação de 300 ppm de zinco e realização da saturação prévia no qual, o tempo ficou em 5 horas e 14 minutos. Já, para as argamassas com agregado reciclado, o tempo máximo para início de pega foi de 3 horas e 58 minutos, também para a argamassa com 300 ppm de zinco, com realização da saturação prévia. Esse atraso na hidratação das argamassas com 300 ppm de zinco ocorreu pela sorção do zinco no C-S-H ($\text{CaZnSiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e pela precipitação de uma nova fase ($\text{Ca}_3\text{Al}_4\text{ZnO}_{10}$). O zinco reagiu com o C_3S e com o C_3A , formando novos compostos, e conseqüentemente ocasionou o retardo da supersaturação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e a precipitação do C-S-H.

De modo geral constatou-se que nas argamassas com agregado leve, a influência dos metais segue uma tendência de, em todos os casos, retardar a hidratação do cimento, devido à interferência dos metais (chumbo, cromo ou zinco) com o cimento, nos quais é formado um revestimento gelatinoso sobre a superfície dos grãos de cimento, pela formação de hidróxido de metais pesados.

O efeito benéfico da cura interna foi verificado nos resultados de resistência mecânica, principalmente nas primeiras idades, com resistências superiores à referência com apenas agregado natural (com aumento de até 115 %), bem como nas propriedades de transporte e compatibilidade ambiental, aonde por uma maior formação de produtos de hidratação houve densificação da matriz reduzindo a permeabilidade, porosidade, tortuosidade (em média 5 %), e conseqüentemente, a liberação dos metais pesados para o ambiente. Sendo que, os metais pesados foram retidos nas argamassas por sorção, substituição, precipitação e retenção estrutural.

Várias tecnologias têm sido desenvolvidas para tornar um resíduo perigoso em não perigoso ou para reduzir o seu potencial de liberação de metais pesados no ambiente. Este trabalho propôs um procedimento de incorporação do agregado reciclado para auxiliar na retenção dos metais pesados no processo de solidificação/ estabilização e evidenciou-se que foi possível utilizar o agregado reciclado como sorvente químico eficaz para os metais pesados presente em resíduos industriais e com a junção ao processo de solidificação/ estabilização torna-se uma nova metodologia para este fim. Bem como, com reduções significativas do consumo de cimento (6,5 a 18,6 %).

Ao analisarmos os resultados quando utilizado o material sintético, ou seja, contaminado com metal pesado na forma de sal; e quando

utilizado o lodo industrial, no preparo do produto real, pode-se obter as seguintes conclusões:

- Pela redução da relação a/c de 0,5 para 0,42 no preparo do lodo solidificado, ocorreu uma redução da trabalhabilidade e aumento do consumo de cimento.

- Quando utilizado o lodo industrial verificou-se redução da absorção por imersão e porosidade aberta em relação ao material sintético.

- As resistências mecânicas das argamassas com o lodo solidificado, apresentaram, em todos os casos, resistências superiores ao material sintético. Esse aumento foi atribuído a menor relação a/c.

Assim, os resultados desta pesquisa podem contribuir para o aumento das taxas de reciclagem da fração inferior a 4,8 mm do agregado reciclado, aumentar o ciclo de vida dos materiais de construção, reduzir o consumo de recursos não renováveis e promover a utilização de materiais de construção sustentáveis.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando a continuidade desse tema de pesquisa, recomenda-se as seguintes abordagens:

1. Verificar o potencial de sorvente químico do agregado reciclado quando este apresentar um teor de pasta aderida superior a 20 %;
2. Avaliar a retração autógena e a retração por secagem de argamassas com o agregado reciclado seco e saturado previamente;
3. Verificar o potencial de sorvente químico do agregado reciclado com outros metais pesados, outros resíduos e em outras proporções;
4. Avaliar o potencial de redução do consumo de cimento e aumento do teor de agregado reciclado (superior a 25 %), visando reduzir o consumo de matéria-prima virgem e adequar a resistência mecânica final às recomendações normativas.

8 REFERÊNCIAS

AİTCIN, P. C. Curing compounds. In: Aİtcin, P. C., Flatt, R. J. (Eds.), Science and Technology of Concrete Admixtures, Elsevier (Chapter 25), p. 485-486, 2016.

AİTCIN, P. C. Phenomenology of cement hydration. In: Editors Aİtcin, P.-C., Flatt, R.J. Science and Technology of Concrete Admixtures, Elsevier (Chapter 2), p. 15-25, 2016a.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 308-213 R-13: Report on internally cured concrete using pre-wetted absorptive lightweight aggregate. Farmington Hills, June, 2013.

AMERICAN NUCLEAR SOCIETY. ANS 16.1. Measurement of the leachability of solidified low-level radioactive wastes by a short-term test procedure. 1986.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 4874. Standard test method for leaching solid material in a column apparatus. Philadelphia, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 5084. Standard Test Method for evaluating the freeze-thaw durability of dry-cast segmental retaining wall units and related concrete units, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM Standard C 150/ C 150M. Standard Specification for Portland Cement. ASTM, International, West Conshohocken, PA, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM Standard C-90. Standard Specification for Loadbearing Concrete Masonry Units, ASTM, International, West Conshohocken, PA, 2012.

ANDRADE, L. B. Análise da influência da substituição do agregado miúdo natural por materiais granulares porosos residuais na fase plástica de concretos. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006: Solubilização de resíduos – Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10786: Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15261: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Norma Mercosul. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados – Determinação de massa unitária e do volume de vazios. Norma Mercosul. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Norma Mercosul. Rio de Janeiro, 2009.

BAILEY, S. E.; OLIN, T. J.; BRICKA, R. M.; ADRIAN, D. D. A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals. *Water Research*, v. 33, p. 2469-2479, 1999.

BENTUR, A.; IGARASHI, S.; KOVLER, K. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. *Cement and Concrete Research*, 31, p. 1587-1591, 2001.

BENTZ, D. P. Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars. *Cement & Concrete Composites*, v. 31, p. 285-289, 2009.

BENTZ, D. P.; HANSEN, K. K. Preliminary Observations of Water Movement in Cement Pastes During Curing Using X-ray Absorption. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 7, p. 1157-1168, 2000.

BENTZ, D. P.; KOENDERS, E. A. B.; MÖNNIG, S.; REINHARDT, H. W.; BREUGEL, K.; YE, G. Chapter 4: Materials science-based models. In *Rilem TC 196-ICC: State-of-the-art report*, June, 2007.

BENTZ, D. P.; LURA, P.; ROBERTS, J. W. Mixture Proportioning for Internal Curing. *Concrete International*, v. 27, n. 2, p. 35-40, 2005.

BENTZ, D. P.; SNYDER, K. A. Protected Paste Volume in Concrete-Extension to Internal Curing Using Saturated Lightweight Fine Aggregate. *Cement and Concrete Research*, v. 29, p. 1863-1867, 1999.

BENTZ, D. P.; STUTZMAN, P. E. Internal curing and microstructure of high-performance mortars. *Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology*. Detroit, p. 81-90, 2008.

BENTZ, D. P.; WEISS, W. J. Internal Curing: A 2010 state-of-the-art review. *National Institute of Standards and Technology, NISTIR 7765, USA*, 2011.

BENTZ, P. D. Influence of curing conditions on water loss and hydration on cement pastes with and without fly ash substitution. *National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6886, USA*, 2002.

BENTZ, P. D.; HALLECK, P. M.; GRADER, A. S.; ROBERTS, J. W. Four-Dimensional X-ray Microtomography Study of Water Movement during Internal Curing. In *Proceedings of the International RILEM Conference – Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*, Eds. Jensen, O. M.; Lura, P. and Kovler, K. RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux, France, p. 11-20, 2006.

BLANCO-VARELA, M. T.; MARTINEZ-RAMIREZ, S.; VÁZQUEZ, T.; GENER, M.; CARMONA-QUIROGA, P. M. Actividad puzolánica de una roca volcánica zeolítica. *Cemento y Hormigón*, n. 889, p. 12-21, 2008.

BOBIRICA, C.; BOBIRICA, L.; STANESCU, R.; CONSTANTINESCU, I. Leaching behavior of cement-based solidified Wastes containing hexavalent chromium. *U.P.B. Sci. Bull., Series B*, Vol. 72, Iss. 1, 2010.

BOGAS, J. A.; BRITO, J.; FIGUEIREDO, J. M. Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 89, n. 15, p. 187-195, 2015.

BREMNER, T. W.; CANO, J; BALCOM, B.; HOLM, T. A. Use of Magnetic Imaging to Study Moist Curing. Presented at ACI Fall 2002 Convention, Session High-Performance Structural Lightweight Concrete, Phoenix, AZ, 2002.

British Standard. BS EN 13055-1:2002. Lightweight aggregates – Part 1: Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout. May, 2002.

BRITO, A. L. F. Protocolo de avaliação de materiais resultantes da estabilização por solidificação de resíduos. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - SC, 2007.

BROUGH, A. R.; DOBSON, C. M.; RICHARDSON, I. G.; GROVES, G. W. Application of selective ²⁹Si isotopic enrichment to studies of the structure of Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) Gels. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 77, n. 2, p. 593-596, 1994.

BULLARD, J. W.; JENNINGS, H. M.; LIVINGSTON, R. A.; NONAT, A.; SCHERER, G. W.; SCHWEITZER, J. S.; SCRIVENER, K. L.; THOMAS, J. J. Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 1208-1223, 2011.

BULUT, U.; OZVERDI, A.; ERDEM, M. Leaching behavior of pollutants in ferrochrome arc furnace dust and its stabilization/ solidification using ferrous sulphate and Portland cement. *Journal of Hazardous Materials*, v. 162, p. 893-898, 2009.

BUTLER, L.; WEST, J. S.; TIGHE, S. L.; The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete

and steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 1037-1049, 2011.

CALLISTER Jr., W. D. *Ciência e Engenharia de materiais: Uma introdução*. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 7 ed., 2007.

CASTRO, J. *Moisture transport in cement based materials: application to transport tests and internal curing*. Doctor of philosophy. Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2011.

CASTRO, J.; DE LA VARGA, I.; GOLIAS, M.; WEISS, W. *Extending Internal Curing Concepts to Mixtures Containing High Volumes of Fly Ash*. International Bridge Conference. 2010.

CASTRO, J.; KEISER, L.; GOLIAS, M. WEISS, J. *Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures*. *Cement & Concrete Composites*, v. 33, p. 1001-1008, 2011.

CHANDRA, S.; BERNTSSON, L. *Lightweight aggregate concrete*. Construction materials Science and technology series. Chapter 2: Production of lightweight aggregates and its properties. Noyes Publication, 2002.

CHEN, Q. Y.; TYRER, M.; HILSS, C. D.; YANG, X. M.; CAREY, P. *Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/ stabilisation: A review*. *Waste Management*, v. 29, p. 390-403, 2009.

CIOFFI, R.; LAVORGNA, M.; SANTORO, L. *Environmental and technological effectiveness of a process for the stabilization of a galvanic sludge*. *Journal of Hazardous Materials*, v. B89, p. 165–175, 2002.

COLEMAN, N. J.; LEE, W. E.; SLIPPER, I. J. *Interactions of aqueous Cu^{2+} , Zn^{2+} and Pb^{2+} ions with crushed concrete fines*. *Journal of Hazardous Materials*, v. B121, p. 203-213, 2005.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 307*, 5 de Julho, 2002.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 448*, 18 de Janeiro, 2012.

CONG, X.; KIRKPATRICK, R. J. ^{17}O and ^{29}Si MAS NMR study of $\beta\text{-C}_2\text{S}$ hydration and the structure of calcium-silicate hydrates. *Cement and Concrete Research*, v. 23, p. 1065-1077, 1993.

- CONG, X.; KIRKPATRICK, R. J. ^{29}Si MAS RMN study of the structure of calcium silicate hydrate. *Advanced Cement Based Materials*, n. 3, p. 144-156, 1996.
- CORINALDESI, V. Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars. *Cement & Concrete Composites*, v. 31, p. 505-510, 2009.
- CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Behavior of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 1, p. 289-294, 2009.
- CUNEY, M. ; CLOIREC, P. ; OLLIVER, J. Application des tests de lixiviation (NFX 31-210) à des produits naturellement exposés à l'action de l'eau. *Record*, 1995.
- CUSSON, D.; HOOGEVEEN, T. Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking. *Cement and Concrete Research*, v. 38, p. 757-765, 2008.
- DAMRONGSIRI, S. Feasibility of using demolition waste as an alternative heavy metal immobilizing agent. *Journal of Environmental Management*, v. 192, p. 197-202, 2017.
- DAPENA, E.; ALAEJOS, P.; LOBET, A.; PÉREZ, D. Effect of recycled sand content on characteristics of mortars and concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 23, p. 414-422, 2011.
- DELL'ORSO, M.; MANGIALARDI, T.; PAOLINI, A. E.; PIGA, L. Evaluation of the leachability of heavy metals from cement-based materials. *Journal of Hazardous Materials*, p. 1-8, 2012.
- DIET, J. N.; MOSZKOWICZ, P.; SORRENTINO, D. Behaviour of ordinary Portland cement during the stabilization/ solidification of synthetic heavy metal sludge: macroscopic and microscopic aspects. *Waste and management*, v. 18, p. 17-24, 1998.
- DIN 38414, Part 4. German standard methods for the examination of water. Waste water and sludge and sediments (Group S). Determination of Leachability by Water (S4), 1984.
- DUAN, Z. H.; POON, C. S. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials and Design*, v. 58, p. 19-29, 2014.

EN 12457-4. European Committee for Standardization, CEN. Characterization of waste –Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges – Part 4: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 10 mm (without or with size reduction). Brussels. 2002.

ENGELHARDT, G. Multinuclear solid-state NMR in silicate and zeolite chemistry. *Trends in analytical chemistry*, v. 8, n. 9, p. 343-347, 1989.

ENGELSEN, C. J.; VAN DER SLOOT, H. A.; WIBETOE, G.; JUSTNES, H.; LUND, W.; STOLTENBERG-HANSSON, E. Leaching characterization and geochemical modelling of minor and trace elements released from recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, v. 40, p. 1639-1649, 2010.

ENVIRONMENT AGENCY. EA NEN 7375:2004. Leaching characteristics of moulded or monolithic building and waste materials. Determination of leaching of inorganic components with the diffusion test. 'The tank test'. Netherlands Normalisation Institute Standard, 2005.

ENVIRONMENT AGENCY. Waste acceptance at landfills: Guidance on waste acceptance procedure and criteria. Bristol, November, 2010.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Chapter twenty: Solidification/ stabilization processes. *Developments in Geotechnical Engineering*, v. 82, p. 529-557, 1998.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Method 1311: Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP). United State, 2001.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Method 1312: Synthetic precipitation leaching procedure. In EPA SW-846: Test methods for evaluating solid waste, physical/ chemical methods, September, 1994.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Method 1313: Liquid-Solid partitioning as a function of eluate pH using a parallel batch extraction procedure. Interlaboratory validation of the Leaching Environmental Assessment Framework (LEAF). EPA 600/R-12/623, 2012.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Solidification/ Stabilization. Resource guide. United States, April, 1999.

ESCSI. Internal Curing. Expanded Shale, Clay and Slate Institute (ESCSI): Rotary kiln structural lightweight aggregate. 2010. Disponível em: http://www.escsi.org/ContentPage.aspx?id=205&ekmense=1b7c39fc_61_74_btnlink. Acesso em 20 de Setembro de 2017.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 37, p. 735-742, 2007.

EUROPEAN COMMUNITIES. Council Directive of 19 December 2002 on establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of an Annex II to Directive 1999/31/EC (2003/33/EC), 2002.

FERNÁNDEZ, C. J. Sustainability concepts applied to the design of recycled aggregate concrete. Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya – Departament d'Enginyeria de la Construcció, Barcelona, March, 2015.

GARTNER, E.; MARUYAMA, I.; CHEN, J. A new model for the C-S-H phase formed during the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, v. 97, p. 95-106, 2017.

GHAHAM, M. C.; FARMER, J. G.; ANDERSON, P.; PATERSON, E.; HILLIER, S.; LUMSDON, D. G.; BEWLEY, R. J. F. Calcium polysulfide remediation of hexavalent chromium contamination from chromite ore processing residue. *Science of the Total Environment*, v. 364, p. 32-44, 2006.

GHOURECHIAN, S.; WYRZYKOWSKI, M.; LURA, P.; SHEKARCHI, M.; AHMADI, B. An investigation on the use of zeolite aggregates for internal curing of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 40, p. 135-144, 2013.

GIERCICZNY, Z.; KRÓL, A. Immobilization of heavy metals (Pb, Cu, Cr, Zn, Cd, Mn) in the mineral additions containing concrete composites. *Journal of Hazardous Materials*, v. 160, p. 247-255, 2008.

GINEYS, N.; AOUAD, G.; DAMIDOT, D. Managing trace elements in Portland cement – Part II: Comparison of two methods to incorporate Zn in a cement. *Cement & Concrete Composites*, v. 33, p. 629-636, 2011.

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*, v. 32, p. 563-570, 2010.

GLASSER, F. P. Application of inorganic cement to the conditioning and immobilization of radioactive wastes. University of Aberdeen. Old Aberdeen Scotland, 2011.

GLASSER, F. P. Fundamental aspects of cement solidification and stabilization. *Journal of Hazardous Materials*, v. 52, p. 151-170, 1997.

GOLIAS, M.; CASTRO, J.; WEISS, J. The influence of the initial moisture content of lightweight aggregate on internal curing. *Construction and Building Materials*, v. 35, p. 52-62, 2012.

GOLLMANN, M. A. C. Estudo da solidificação/ estabilização de Pb, Ni, Mn e Cr em matrizes de argamassas: Uso de crisotilas e zeólita A como potenciais aditivos pozolânicos. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS, 2013.

GOUGAR, M. L. D.; SCHEETZ, B. E.; ROY, D. M. Ettringite and C-S-H Portland Cement phases for waste ion immobilization: A review. *Waste Management*, v. 16, n. 4, p. 295-303, 1996.

HAN, Y.; ZHANG, J.; LUOSUN, Y.; HAO, T. Effect of internal curing on internal relative humidity and shrinkage of high strength concrete slabs. *Construction and Building Materials*, v. 61, p. 41-49, 2014.

HANSEN, T. C. Physical structure of hardened cement paste. A classical approach. *Matériaux et Constructions*, v. 19, n. 114, 1986.

HAQUE, M. A. Assessment of nickel leaching phenomena from landfill waste mixed paving block for eco-friendly field application. *Journal of Cleaner Production*, v. 139, p. 99-112, 2016.

HE, Y.; ZHANG, X.; ZHANG, Y.; ZHOU, Y. Effects of particle characteristics of lightweight aggregate on mechanical properties of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 72, p. 270-282, 2014.

HEKAL, E.E.; HEGAZI, W.S.; KISHAR, E.A.; MOHAMED, M.R. Solidification/ Stabilization of Ni (II) by various cement pastes. *Construction and Building Materials*, v.25, p.109-114, 2011.

- HENKENSIEFKEN, R. Internal Curing in Cementitious Systems made using Saturated Lightweight Aggregate. Masters Thesis. Purdue University. Purdue, IN., 2008.
- HENKENSIEFKEN, R.; CASTRO, J.; BENTZ, D.; NANTUNG, T.; WEISS, J. Water absorption in internally cured mortar made with water-filled lightweight aggregate. *Cement and Concrete Research*, v. 39, p. 883-892, 2009.
- HODUL, J.; DOHNÁLKOVÁ, B.; DROCHYTKA, R. Solidification of hazardous waste with the aim of material utilization of solidification products. 7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering (MATBUD'2015). *Procedia Engineering*, v. 108, p. 639-646, 2015.
- HODUL, J.; DROCHYTKA, R. Examination of microstructure of solidification product containing hazardous sludge. International Conference on Ecology and new Building materials and products, ICEBMP 2016. *Procedia Engineering*, v. 151, p. 402-409, 2016.
- HOFF, G. C. The use of lightweight fines for the internal curing of concrete. Northeast solite Corporation. Mississippi, August, 2002.
- HUNCE, S. Y.; AKGUL, D.; DEMIR, G.; MERTOGLU, B. Solidification/ stabilization of landfill leachate concentrate using different aggregate materials. *Waste Management*, v. 32, p. 1394-1400, 2012.
- INSTRUCCIÓN DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL: EHE-08. Anejo 15: Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados. Real decreto 1247. Gobierno de España. Agosto, p. 526, 2008.
- IZQUIERDO, S.; DIAS, J.; MEJÍA, R.; TORRES, J. Cemento adicionado con un residuo del proceso de craqueo catalítico (FCC): hidratación y microestructura. *Revista ingeniería de construcción*, v. 28, n. 2, 2013.
- JANNOT, Y. Isothermes de sorption: Modeles et determination. Bourdeaux, Université Bordeaux I, laboratoire TREFLE, juillet, 2008.
- JANSEN, G. H. Caracterização microestrutural e determinação de propriedades higrotérmicas de argamassas com adição de cinzas pesadas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Florianópolis, 2007.

JANTZEN, C.; JOHNSON, A.; READM D.; STEGEMANN, J. A. Cement in waste management. *Advances in Cement Research*, v. 22, n. 4, p. 225-231, 2010.

JENNINGS, H. M. Refinements to colloid model of C-S-H in cement: CM-II. *Cement and Concrete Research*, v. 38, p. 275-289, 2008.

JENSEN O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials. I. Principles and theoretical background, *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 5, p. 647-654, 2001.

JENSEN, O. M. Mechanisms of Internal water curing. In: Editors Kovler, K. and Jensen, O.M. Bagnaux, Technical Committee 196-ICC. *Internal Curing of Concrete*. RILEM Publications S.A.R.L., (Chapter 3), 2007.

JENSEN, O. M.; LURA, P. Chapter 5: Materials and methods for internal curing. In *Rilem TC 196-ICC: State-of-the-art report*, June, 2007.

JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. Caracterización del cemento por ^{29}Si y ^{27}Al RMN-MAS. Estado del arte. *Cemento Hormigón*, ISSN 008-8919, n. 936, p. 12-20, 2010.

JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; LÓPEZ, M.; FERNÁNDEZ, J. M.; BRITO, J. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Constructions and Building Materials*, v. 40, p. 679-690, 2013.

JOCHEM, L. F. Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de RCD: Características físicas e propriedades da microestrutura. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC, 2012.

JOCHEM, L. F.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. The influence of fine sand from construction-demolition wastes (CDW) in the mortar properties. *Key Engineering Materials*, v. 600, p. 357-366, 2014.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 872-877, 2009.

JUSTNES, H.; MELAND, I.; BJOERGUM, J. O.; KRANE J.; SKJETNE, T. NMR - A powerful tool in cement and concrete research. *Advances in Cement Research*, v. 3, p. 105-110, 1990.

KABAY, N.; AKÖZ, F. Effect of pre-wetting methods on some fresh and hardened properties of concrete with pumice aggregate. *Cement & Concrete Composites*, v. 34, p. 503-507, 2012.

KATZ, A.; BENTUR, A.; KJELLEN, K. O. Normal and High Strength Concretes with Lightweight Aggregates. In *RILEM Report 20: Engineering and Transport Properties of the Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites*, M.G. Alexander, Arliguie, G., Ballivy, G., Bentur, A., and Marchand, J., Editor. RILEM Publications S.A.R.L.: Cachan Cedex, France, p. 71-88, 1999.

KIM, H.; BENTZ, D. Internal curing with crushed returned concrete aggregates for high performance concrete. *Concrete Technology Forum: Focus Sustainable Development*, 2008.

KINDNESS, A.; MACIAS, A.; GLASSER, F. P. Immobilization of chromium in cement matrices. *Waste Management*, v. 14, n. 1, p. 3-11, 1994.

KISKU, N.; JOCHI, H.; ANSARI, M.; PANDA, S. K.; NAYAK, S.; DUTTA, S. C. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, v. 113, p. 721-740, 2017.

KLIEGER, P. Early high-strength concrete for prestressing. *Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association. Research Department. Bulletin 91*, p. A5-2, March, 1957.

KOMARNENI, S.; ROY, D. M. Naturally occurring 1.4 nm Tobermorite and synthetic Jennite: Characterization by ^{27}Al and ^{29}Si MASNMR spectroscopy and cation exchange properties. *Cement and Concrete Research*, v. 17, P. 891-895, 1987.

KOSSON, D. S.; VAN DER SLOOT, H. A.; SANCHEZ, F.; GARRABRANTS, A. C. An integrated framework for evaluating leaching in waste management and utilization of secondary materials. *Environmental Engineering Science*, v. 19, n. 3, p. 159-204 2002.

KOU, S. C.; POON, C. S. Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources. *Magazine of Concrete Research*, v. 60, n. 1, p. 57-64, 2008.

KOU, S.; POON, C.; ETXEBERRIA M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement & Concrete Composites*, v. 33, p.286-291, 2011.

KOVLER, K.; JENSEN, O. M. Chapter 10: Conclusions and outlook. In Rilem TC 196-ICC: State-of-the-art report, June, 2007.

KWAN, W. K.; RAMLI, M.; KAM, K. J.; SULIEMAN, M. Z. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. , *Construction and Building Materials*, v. 26, p. 565–573, 2012.

LAFOREST, G.; DUCHESNE, J. Immobilization of chromium (VI) evaluated by binding isotherms for ground granulated blast furnace slag and ordinary Portland cement. *Cement and Concrete research*, v 35, p. 2322-2332, 2005.

LAMPRIS, C.; STEGEMANN, J. A.; PELLIZON-BIRELLI, M.; FOWLER, G. D.; CHEESEMAN, C. R. Metal leaching from monolithic stabilized/solidified air pollution control residues, *Journal Hazardous Materials*, v. 185, p. 1115-1123, 2011.

LASHERAS-ZUBIATE, M.; NAVARRO-BLASCO, I; FERNÁNDEZ, J. M.; ÁLVAREZ, J. I. Encapsulation, solid-phases identification and leaching of toxic metals in cement systems modified by natural biodegradable polymers. *Journal of Hazardous Materials*, p. 7-17, 2012.

LEDESMA, E. F.; JIMÉNEZ, J. R.; FERNÁNDEZ, J. M.; GALVÍN, A. P.; AGREALA, F.; BARBUDO, A. Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 71, p. 289-298, 2014.

Lei 12.305/ 2010. Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Governo Federal – Ministério do Meio Ambiente. Brasília, Agosto, 2010.

LEISINGER, S. M.; LOTHENBACH, B.; SAOUT, G. L.; JOHNSON, C. A. Thermodynamic modeling of solid solutions between monosulfate and monochromate $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Ca}[(\text{CrO}_4)_x(\text{SO}_4)_{1-x}]\cdot n\text{H}_2\text{O}$. *Cement and Concrete Research*, v. 42, p. 158-165, 2012.

LI, X.; CHEN, Q.; ZHOU, Y.; TYRER, M.; YU, Y. Stabilization of heavy metals in MSWI fly ash using silica fume. *Waste Management*, v. 34, p. 2494-2504, 2014.

LI, X.; HE, C.; BAI, Y.; MA, B; WANG, G.; TAN, H. Stabilization/solidification on chromium (III) wastes by C_3A and C_3A hydrated matriz. *Journal of Hazardous Materials*, v. 268, p. 61-67, 2014a.

- LIN, C.; CHEN, J.; LIN, C. An NMR, XRD and EDS study of solidification/ stabilization of chromium with Portland cement and C_3S . *Journal of Hazardous Materials*, v. 56, p. 21-34, 1997.
- LIN, C.; CHEN, J.; LIN, C. An NMR, XRD study of solidification/ stabilization of chromium with Portland cement and β - C_2S . *Journal of Hazardous Materials*, v. 48, p. 137-147, 1996.
- LIPPMAA, E.; MAGI, M.; TARMAK, M.; WIEKER, W.; GRIMMER, A. R. A high resolution ^{29}Si NMR study of the hydration of tricalciumsilicate. *Cement and Concrete Research*, v. 12, p. 597-602, 1982.
- LOOTENS, D.; BENTZ, D. P. On the relation of setting and early-age strength development to porosity and hydration in cement-based materials. *Cement and Concrete Composites*, v. 68, p. 9-14, 2016.
- LOPEZ, M. Creep and shrinkage of high performance lightweight concrete: A multi-scale investigation. Doctoral Thesis Dissertation. Civil Engineering in the School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, 2005.
- LOTFLI, S.; EGGIMANN, M.; WAGNER, E.; MRÓZ, R.; DEJA, J. Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. *Construction and Building Materials*, v. 95, p. 243-256, 2015.
- LU, H.; WEI, F.; TANG, J.; GIESY, J. Leaching of metals from cement under simulated environmental conditions. *Journal of Environmental Management*, v. 169, p. 319-327, 2016.
- LURA, P. Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete. Doctoral Thesis. Technical University of Delft. Delft, The Netherlands, 2003.
- LURA, P.; BENTZ, D.P.; LANGE, D.A.; KOVLER, K.; BENTUR, A.; AND VAN BREUGEL, K. Measurement of Water Transport from Saturated Pumice Aggregates to Hardening Cement Paste. *Materials and Structures*, 2006.
- LV, Y.; LI, X.; SCHUTTER, G.; MA, B. Stabilization of Cr(III) wastes by C_3S and C_3S hydrated matrix: comparison of two incorporation methods. *Materials and Structures*, v. 49, p. 3109-3118, 2016.
- MALVIYA, R.; CHAUDHARY, R. Factors affecting hazardous waste solidification/ stabilization: A review. *Journal of Hazardous Materials*, v. B137, p. 267-276, 2006.

MARTÍNEZ, I.; ETXEBERRIA, M.; PAVÓN, E.; DÍAZ, N. A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. *Construction and Building Materials*, v. 49, p. 384-392, 2013.

MEDINA, C.; FRÍAS, M.; ROJAS, M. I. S. Leaching in concretes containing recycled ceramic aggregate from the sanitary ware industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 66, p. 85-91, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. 3 ed. McGraw-Hill, New York, 2006.

MEROUANI, L. Phénomènes de sorption et de transfert d'humidité dans des matériaux du bâtiment. Étude expérimentale comparative d'un mortier de ciment et d'un enduit de façade. Thèse Docteur 3 Cycle. Institut National Polytechnique de Grenoble, Novembre de 1987.

MOON, H. J. Assessing mold risk in buildings uncertainty. PhD thesis. Georgia Institute of Technology, 2005.

MOULIN, I.; ROSE, J.; STONE, W.; BOTTERO, J.; MOSNIER, F. HAEHNEL, C. Lead, zinc and chromium (III) and (VI) speciation in hydrated cement phases. *Waste Materials in Construction*, p. 269-280, 2000.

MULLER, A.; STARK, U. L. Crushed sand-waste or valuable product. *Aufbereitungs Technik*, v.10, p.30-43, 2005.

MYERS, T. E.; FRANCINGUES, N. R.; THOMPSON, D. W.; HILL, D. O. Sorbent assisted solidification of a hazardous waste. In *International Conference on New Frontiers for Hazardous Waste Management*. EPA/600/9-85/025. U.S. EPA, p. 348-355, Cincinnati, 1985.

NAPIA, C.; SINSIRI, T.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. Leaching of heavy metals from solidified waste using Portland cement and zeolite as a binder. *Waste Management*, v. 32, p. 1459-1467, 2012.

NENO, C.; BRITO, J.; VEIGA, R. Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. *Materials Research*, v. 17, n. 1, p. 168-177, 2014.

NYAME, B. K.; ILLSTON, J. M. Capillary Pore Structure and Permeability of Hardened Cement Paste. 7th International Congress on the Chemistry of Cement, v. 3, p. 181-185, 1980.

- OJOVAN, M. I.; LEE, W. E. An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation. Second Edition, Elsevier, United Kingdom, 2014.
- PARRY-JONES, G.; AL-TAYYIB, A. J.; AL-DULAIKAN, S. U.; AL-MANA, A. I. ^{29}Si MAS-NMR hydration and compressive strength study in cement paste. Cement and Concrete Research, vol. 19, p. 228-234, 1989.
- PAUL, A.; LOPEZ, M. Assessing lightweight aggregate efficiency for maximizing internal curing performance. ACI Materials Journal, Technical Paper, n. 108-M41, p. 385-393, 2011.
- PEDRO, D.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. Construction and Building Materials, v. 71, p. 141-151, 2014.
- PERRAKI, KONTORI, TSIVILIS, KAKALI, Cement and concrete composites, 32, 128, 2010.
- PHILLIPS, J. W. Applying techniques for solidification and transportation of radioactive wastes to hazardous waste. In Management of Uncontrolled Hazardous Waste Sites. p. 206-211, Washington, D. C. October, 1981.
- PINTO, C.A. ; DWECK, J. ; SANSALONE, J. J.; BÜCHLER, P. M.; CARTLEDGE, F. K.; HAMASSAKI, L. T.; ALBANEZ, N. E. K.; VALENZUELA-DIAZ, F. R. Evaluation of S/S process of tannery waste in cement by structural and mechanical analysis. Mat. Sci. Forum. V.660-661, p. 1130-1136, 2010.
- POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. Construction and Building Materials, v. 16, p. 281-289, 2002.
- Portaria MS nº 2914. Portaria Federal. Potabilidade da água. 2011.
- RASHED, M. N. Adsorption Technique for the Removal of Organic Pollutants from Water and Wastewater. INTECH Open Access Publisher, 2013.
- REYES, W.; KINGSBURY, S.; BATES, E.; BERRESFORD, L.; CAPASSO, J. R.; CLOCK, J.; COLLINS, K.; DONA, C.; FIEDLER, L.; FITZPATRICK, M.; GALLOWAY, R.; GARRABRANTS, A.; GRIGGS, C.; GROSSE, D.; *et al.* Development of performance specifications for solidification/ stabilization. S/S-1. ITRC – Interstate Technology & Regulatory Council. Washington, DC, July, 2011.

RILEM Technical Committee 196-ICC. Internal Curing of Concrete. Editors: Kovler, K. and Jensen, O.M. Bagneux, RILEM Publications S.A.R.L., 2007.

RINEHART, T. L.; SCHULZE, D. G.; BRICKA, R. M.; BAJT, S.; BLATCHLEY III, E. R. Chromium leaching vs. oxidation state for contaminated solidified/ stabilized soil. *Journal of Hazardous Materials*, v. 52, p. 213-221, 1997.

ROBERTS, J. Internal Curing in Pavements, Bridge Decks and Parking Structures, Using Absorptive Aggregates to Provide Water to Hydrate Cement not Hydrated by Mixing Water. 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, Jan. 2004.

ROCKLAND, L. B. Saturated salt solutions for static control of relative humidity between 5° and 40 °C. *Analytical chemistry*, v. 32, n. 10, p. 1375-1376. September, 1960.

ROSSIGNOLO, J. A. Structural lightweight concrete: influence of expanded clay on the microstructure of the interfacial transition zone. *Ambiente Construído*, v. 9, p. 119-127, 2009.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete. *Cement & Concrete Composites*, v. 26, p. 375-380, 2004.

SÁEZ DEL BOSQUE, I. F.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; MARTIN-PASTOR, M.; BLANCO-VARELA, M. T. Caracterización de nuevos materiales cementantes. *International Conference on Construction Research*, November, 2013.

SAKULICH, A. R.; BENTZ, D. P. Incorporation of phase change materials in cementitious systems via fine lightweight aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 35, p. 483-490, 2012.

SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. Advances in understanding hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, v. 78, p. 38-56, 2015.

SHI, H.; KAN, L. Study on the properties of chromium residue-cement matrices (CRCM) and the influences of superplasticizers on chromium (VI)-immobilising capability of cement matrices. *Journal of Hazardous Materials*, v. 162, p. 913-919, 2009.

SINYOUNG, S.; SONGSIRIRITTHIGUL, P.; ASAVAPISIT, S.; KAJITVICHYANUKUL, P. Chromium behavior during cement-

production processes: A clinkerization, hydration, and leaching study. *Journal of Hazardous Materials*, v. 191, p. 296-305, 2011.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Relatório Anual. Rio de Janeiro, 2013.

SRIVASTAVA, S.; CHAUDHARY, R.; KHALE, D. Influence of pH, curing time and environmental stress on the immobilization of hazardous waste using activated fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, v. 153, p. 1103-1109, 2008.

STEGEMANN, J. A.; CÔTÉ, P. L. A proposed protocol for evaluation of solidified wastes. *The Science of the Total Environment*, v. 178, p. 103-110, 1996.

SUN, X.; ZHANG, B.; DAI, Q.; YU, X. Investigation of internal curing effects on microstructure and permeability of interface transition zones in cement mortar with SEM imaging, transport simulation and hydration modeling techniques. *Construction and Building Materials*, v. 76, p. 366-379, 2015.

TANTAWY, M. A.; EL-ROUDI, A. M.; SALEM, A. A. Immobilization of Cr(VI) in bagasse ash blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, v. 30, p. 218-223, 2012.

TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry*. Academic Press, London, 1997.

TORRAS, J.; BUJ, I.; ROVIRA, M.; PABLO, J. Semi-dynamic leaching tests of nickel containing wastes stabilized/ solidified with magnesium potassium phosphate cement. *Journal of Hazardous Materials*, v. 186, p. 1954-1960, 2011.

TRAPOTE-BARREIRA, A.; PORCAR, L.; CAMA, J.; SOLER, J. M.; ALLEN, A. J. Structural changes in C-S-H gel during dissolution: Small-angle neutron scattering and Si-NMR characterization. *Cement and Concrete Research*, v. 72, p. 79-89, 2015.

ULM, F. J.; CONSTANTINIDES, G.; HEUKAMP, F. H. Is concrete a poromechanics material – A multiscale investigation of poroelastic properties. *Materials and Structures, Concrete Science and Engineering*, v. 37, p. 43-58, 2004.

VAN DER SLOOT, H. A. Quick techniques for evaluating the leaching properties of waste materials: their relation to decisions on utilization and disposal. Elsevier Science. *Trends in analytical chemistry*, v. 17, n. 5, p. 298-310, 1998.

VAN DER SLOT, H. A. Comparison of the characteristic leaching behavior of cements using standard (EN 196-1) cement mortar and an assessment of their long-term environmental behavior in construction products during service life and recycling. *Cement and Concrete Research*, v. 30, p. 1079-1096, 2000.

VARGAS, P.; RESTREPO-BAENA, O.; TOBÓN, J. I. Microstructural analysis of interfacial transition zone (ITZ) and its impact on the compressive strength of lightweight concretes. *Construction and Building Materials*, v. 137, n. 15, p. 381-389, 2017.

VEGAS, I.; AZKARATE, I.; JUARRERO, A.; FRÍAS, M. Design and performance of masonry mortars made with recycled concrete aggregates. *Materiales de Construcción*, v. 59, n. 295, p. 5-18, 2009.

VOLLPRACHT, A.; BRAMESHUBER, W. Binding and leaching of trace elements in Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, v. 79, p. 76-92, 2016.

WANG, F.; SHANG, D.; WANG, M.; HU, S.; LI, Y. Incorporation and substitution mechanism of cadmium in cement clinker. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 2292-2299, 2016.

WANG, F.; WANG, H.; JIN, F.; AL-TABBAA, A. The performance of blended conventional and novel binders in the in-situ stabilization/solidification of a contaminated site soil. *Journal of Hazardous Materials*, v. 285, p. 46-52, 2015.

WANG, S.; PENG, Y. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, v. 156, p. 11-24, 2010.

WASTEWATER TECHNOLOGY CENTER - WTC. Proposed evaluation protocol for cement-based stabilization/solidification wastes. Canada: Environment Canada. 1991.

WEBER, S.; REINHARDT, H. W. A New Generation of High Performance Concrete: Concrete with Autogenous Curing. *Advanced Cement Based Materials*, v. 6, n. 2, p. 59-68, 1997.

WEBER, S.; REINHARDT, H. W. Manipulating the Water Content and Microstructure of High Performance Concrete Using Autogenous Curing. *Modern Concrete Materials: Binders, Additions, and Admixtures*, Eds. R.K. Dhir and T.D. Dyer, Thomas Telford, p. 567-577, 1999.

- WEEKS, C.; HAND, R. J.; SHARP, J. H. Retardation of cement hydration caused by heavy metals present in ISF slag used as aggregate. *Cement and Concrete Composites*, v. 30, p. 970-978, 2008.
- WEITZMAN, L. Factors for selecting appropriate solidification/ stabilization methods. *Journal of Hazardous Materials*, v. 24, p. 157-168, 1990.
- WILKER, W.; GRIMMER, A. R.; WINKLER, A. Solid-state high-resolution ^{29}Si NMR spectroscopy of synthetic 14 Å, 11 Å and 9 Å tobermorites. *Cement and Concrete Research*, v. 12, p. 333-339, 1982.
- WYRZYKOWSKI, M.; LURA, P. Effect of relative humidity decrease due to self-desiccation on the hydration kinetics of cement. *Cement and Concrete Research*, v. 85, p. 75-81, 2016.
- XIAO, J.; LI, W.; SIN, Z.; LANGE, D. A.; SHAH, S. P. Properties of interfacial transition zones in RAC tested by nano indentation. *Cement and Concrete Composites*, v. 37, p. 276-292, 2013.
- YANG, Y.; YANG, Y.; WANG, Q.; HUANG, Q. Release of heavy metals from concrete made with cement from cement kiln co-processing of hazardous wastes in pavement scenarios. *Environmental. Enge. Science*, v. 28, p. 35-42, 2011.
- YILDIRIM, S. T.; MEYER, C.; HERFELLNER, S. Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze-thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 91, p. 288-296, 2015.
- ZAMPORI, L.; STAMPINO, P. G.; Long-term leaching test of organo-contaminated cement-clay pastes. *Journal of Hazardous Materials*, v. 170, p. 1041-1049, 2009.
- ZANNI, H.; RASSEM-BERTOLO, R.; MASSE, S.; FERNANDEZ, L.; NIETO, P.; BRESSON, B. A spectroscopic NMR investigation of the calcium silicate hydrates present in cement and concrete. *Magnetic Resonance Imaging*, v. 14, numbers 7/8, p. 827-831, 1996.
- ZHANG, M.; GJORV, O. E. Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste. *Cement and Concrete Research*, v. 20, p. 610-618, 1990.
- ZHANG, M.; GJORV, O. E. Penetration of cement paste into lightweight aggregate. *Cement and Concrete Research*, v. 22, p. 47-55, 1992.

ZHUTOVSKY, S.; KOVLER, K. Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 42, p. 20-26, 2012.

ZHUTOVSKY, S.; KOVLER, K.; BENTUR, A. Efficiency of light-weight aggregates for internal curing of high strength concrete to eliminate autogenous shrinkage. *Materials and Structures*, v. 35, p. 97-101, 2002.

ZHUTOVSKY, S.; KOVLER, K.; BENTUR, A. Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete. *Cement & Concrete Composites*, v. 26, p. 499-507, 2004.

ZIEGLER, F.; SCHEIDEGGER, A. M.; JOHNSON, C. A.; DAHN, R.; WIELAND, E. Sorption mechanisms of Zinc to Calcium Silicate Hydrate: X-ray Absorption Fine Structure (XAFS) Investigation. *Environmental Science Technology*, v.35, p. 1550-1555, 2001.

ZIVICA, V. Hardening and properties of cement-based materials incorporating heavy metal oxides. *Bulletin of Materials Science*, v. 20, n. 5, p. 677-683. August, 1997.

ZOU, D.; WEISS, J. Early age cracking behavior of internally cured mortar restrained by dual rings with different thickness. *Construction and Building Materials*, v. 66, p. 146-153, 2014.

ZOU, D.; ZHANG, H.; WANG, Y.; ZHU, J.; GUAN, X. Internal curing of mortar with low water to cementitious materials ratio using a normal weight porous aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 96, p. 209-216, 2015.

9 APÊNDICES

9.1 APÊNDICE 1: TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA – ANOVA

ANOVA - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Resistência à compressão – 1 dia						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Agregado + teor	206,50	3	68,83	28,51	3,2874	Sim
Metal + condição	7,26	5	1,45	0,60	2,9013	Não
Resíduo	36,21	15	2,41			
Total	249,98	23				
Resistência à compressão – 3 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Agregado + teor	126,58	3	42,19	18,15	3,2874	Sim
Metal + condição	18,34	5	3,67	1,58	2,9013	Não
Resíduo	34,87	15	2,32			
Total	179,79	23				
Resistência à compressão – 7 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Agregado + teor	207,80	3	69,27	38,54	3,2874	Sim
Metal + condição	15,20	5	3,04	1,69	2,9013	Não
Resíduo	26,95	15	1,80			
Total	249,95	23				
Resistência à compressão – 28 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Agregado + teor	146,65	3	48,88	19,47	3,2874	Sim
Metal + condição	108,24	5	21,65	8,62	2,9013	Sim
Resíduo	37,66	15	2,51			
Total	292,54	23				
Resistência à compressão – 90 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Agregado + teor	210,59	3	70,20	18,42	3,2874	Sim
Metal + condição	146,24	5	29,25	7,67	2,9013	Sim
Resíduo	57,17	15	3,81			
Total	414,01	23				

ANOVA - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Resistência à tração na flexão – 1 dia						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Agregado + teor	5,11	3	1,70	6,50	3,2874	Sim
Metal + condição	1,11	5	0,22	0,85	2,9013	Não
Resíduo	3,93	15	0,26			
Total	10,16	23				

Resistência à tração na flexão – 3 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Agregado + teor	5,77	3	1,92	9,48	3,2874	Sim
Metal + condição	0,66	5	0,13	0,65	2,9013	Não
Resíduo	3,04	15	0,20			
Total	9,48	23				
Resistência à tração na flexão – 7 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Agregado + teor	3,59	3	1,20	7,15	3,2874	Sim
Metal + condição	0,81	5	0,16	0,96	2,9013	Não
Resíduo	2,51	15	0,17			
Total	6,92	23				
Resistência à tração na flexão – 28 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Agregado + teor	3,51	3	1,17	8,84	3,2874	Sim
Metal + condição	2,12	5	0,42	3,19	2,9013	Sim
Resíduo	1,99	15	0,13			
Total	7,62	23				
Resistência à tração na flexão – 90 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Agregado + teor	3,12	3	1,04	2,59	3,2874	Não
Metal + condição	1,43	5	0,29	0,71	2,9013	Não
Resíduo	6,02	15	0,40			
Total	10,57	23				

ANOVA – ABSORÇÃO POR IMERSÃO

Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Agregado + teor	0,89	3	0,30	1,21	3,2874	Não
Metal + condição	0,73	5	0,15	0,60	2,9013	Não
Resíduo	3,68	15	0,25			
Total	5,31	23				

ANOVA – POROSIDADE ABERTA

Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Agregado + teor	7,12	3	2,37	24,48	3,2874	Sim
Metal + condição	0,61	5	0,12	1,26	2,9013	Não
Resíduo	1,45	15	0,10			
Total	9,18	23				

NOTA: ^a Se o valor $F\alpha$ foi inferior a F, então o efeito possui impacto significativo na resistência à compressão (com 95 % de confiança).

9.2 APÊNDICE 2: DESVIO PADRÃO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

	Material/ Argamassas	Resistência à compressão – Desvio Padrão (MPa)				
		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
AN + RCC	REF-AN	0,3	0,8	1,1	1,0	2,3
	REF	0,9	0,6	0,9	1,9	0,5
	Pb 100 ppm	0,9	1,0	1,0	1,6	0,7
	Cr 100 ppm	0,4	1,2	1,1	0,8	1,2
	Zn 100 ppm	0,6	1,4	0,6	1,2	0,5
	Pb 300 ppm	0,7	0,9	0,3	0,9	0,3
	Cr 300 ppm	0,8	1,2	1,2	0,6	0,6
	Zn 300 ppm	1,0	1,8	1,2	1,0	1,0
	REF + SAT	0,7	1,0	1,1	1,3	0,9
	Pb 100 ppm + SAT	0,4	1,2	2,4	0,9	1,8
	Cr 100 ppm + SAT	0,4	3,1	0,8	1,7	2,3
	Zn 100 ppm + SAT	0,7	2,1	1,9	1,0	1,9
	Pb 300 ppm + SAT	0,5	1,1	1,7	1,1	1,5
	Cr 300 ppm + SAT	1,0	1,1	1,0	0,5	1,8
	Zn 300 ppm + SAT	0,9	0,4	1,0	0,7	2,0
	AN + ALV	REF	0,9	0,8	1,5	0,9
Pb 100 ppm		1,1	2,2	1,4	1,3	1,4
Cr 100 ppm		0,7	0,7	0,8	0,4	1,4
Zn 100 ppm		1,4	1,2	1,3	0,6	1,3
Pb 300 ppm		1,0	1,1	0,9	0,3	1,5
Cr 300 ppm		1,1	0,7	0,4	0,9	1,2
Zn 300 ppm		1,1	1,2	1,4	1,4	2,1
REF + SAT		0,7	1,1	0,8	1,2	1,2
Pb 100 ppm + SAT		1,1	0,7	0,4	1,2	0,4
Cr 100 ppm + SAT		0,9	0,7	1,1	0,8	1,5
Zn 100 ppm + SAT		0,4	1,4	1,2	1,5	2,1
Pb 300 ppm + SAT		0,7	1,1	0,4	1,0	0,9
Cr 300 ppm + SAT		1,2	0,8	0,5	0,5	1,3
Zn 300 ppm + SAT		1,0	1,2	1,0	1,8	1,4

	Material/ Argamassas	Resistência à tração na flexão – Desvio Padrão (MPa)				
		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
AN + RCC	REF-AN	0,2	0,2	0,7	0,8	0,3
	REF	0,3	0,3	0,1	0,9	0,2
	Pb 100 ppm	0,4	0,4	0,2	0,3	0,4
	Cr 100 ppm	0,3	0,2	0,3	0,4	0,3
	Zn 100 ppm	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7
	Pb 300 ppm	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
	Cr 300 ppm	0,3	0,3	0,6	0,5	0,5
	Zn 300 ppm	0,2	0,4	0,2	0,3	0,4
	REF + SAT	0,6	0,2	0,3	0,5	0,1
	Pb 100 ppm + SAT	0,2	0,7	0,5	0,8	0,0
	Cr 100 ppm + SAT	0,2	0,6	0,3	0,5	0,5
	Zn 100 ppm + SAT	0,3	0,5	0,8	0,3	0,3
	Pb 300 ppm + SAT	0,3	0,2	0,9	0,5	0,5
	Cr 300 ppm + SAT	0,5	0,5	0,1	0,7	0,7
	Zn 300 ppm + SAT	0,6	0,4	0,3	0,1	0,5
AN + ALV	REF	0,5	0,4	0,4	0,4	0,2
	Pb 100 ppm	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4
	Cr 100 ppm	0,4	0,3	0,7	0,6	0,5
	Zn 100 ppm	0,4	0,3	0,2	1,0	0,3
	Pb 300 ppm	0,4	0,2	0,3	0,4	0,2
	Cr 300 ppm	0,1	0,4	0,7	0,6	0,7
	Zn 300 ppm	0,2	0,5	0,8	0,9	0,4
	REF + SAT	0,3	0,0	0,3	0,8	0,8
	Pb 100 ppm + SAT	0,2	0,3	0,7	0,0	0,4
	Cr 100 ppm + SAT	0,5	0,5	0,2	0,2	0,0
	Zn 100 ppm + SAT	0,2	0,5	0,7	0,3	0,4
	Pb 300 ppm + SAT	0,2	0,4	0,4	0,3	0,7
	Cr 300 ppm + SAT	0,4	0,4	0,4	0,6	0,2
	Zn 300 ppm + SAT	0,3	0,7	0,8	0,3	0,6

9.3 APÊNDICE 3: CARACTERÍSTICAS DO LODO NO PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO

PROPRIEDADES FÍSICAS – ESTADO FRESCO

As propriedades físicas do lodo em processo de solidificação com o traço 1: 3 e com o traço 1: 2,5, produzidas com substituição de 0, 8,5 e 100 % da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia estão apresentado na Tabela abaixo.

A incorporação de 8,5 % de lodo, nos dois traços, não influenciou na massa específica das argamassas, enquanto que a saturação prévia dos agregados com água destilada e deionizada ou com resíduo de galvanoplastia apresentou a tendência de aumentar a massa específica. A substituição parcial do AN, por ALV e RCC, reduziu a massa específica devido à menor massa específica dos agregados em relação ao agregado natural (verificado na caracterização dos agregados). As argamassas com o traço mais rico (1: 2,5) apresentaram maior massa específica, em todos os casos, quando comparado com o traço 1: 3 pois, o maior teor de cimento auxiliou para uma melhor compactação. Quando as argamassas foram produzidas com 100 % de resíduo de galvanoplastia, reduziram levemente a sua massa específica, quando comparada com as argamassas com 8,5 % de lodo.

O teor de ar incorporado nas argamassas foi superior quando utilizado o agregado leve (nos dois traços), pelas suas características físicas como alta porosidade e absorção. As argamassas com o traço 1: 3 apresentaram teor de ar incorporado em torno de 50 % superior às argamassas com o traço 1: 2,5. Bem como, as argamassas com 100 % de substituição da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia apresentaram teor de ar incorporado inferior às argamassas com 8,5 % de resíduo de galvanoplastia. Por outro lado, nas amostras com 100 % de resíduo o teor de ar incorporado nas amostras com o traço 1: 3 foram inferiores as amostras com traço 1: 2,5. Percebeu-se, também, que as argamassas com o traço 1: 3 e com agregado reciclado apresentaram maior teor de ar incorporado que as argamassas com apenas agregado natural, fato não observado nas argamassas com o traço 1: 2,5, na qual essas argamassas apresentaram, praticamente, o mesmo teor de ar incorporado. Enquanto que as argamassas com 100 % de lodo apresentaram um teor de ar incorporado superior à argamassa com apenas agregado natural, nas duas composições.

A substituição de 8,5 % da água de amassamento por resíduo não afetou a trabalhabilidade das argamassas, assim como a molhagem pré-

via dos agregados, nos dois traços utilizados. A maior influência na trabalhabilidade das argamassas com o traço 1: 3 ocorreram quando substituiu-se 25 % do agregado natural por agregado leve. O qual, por ser um material com maior poder de absorção, reduziu a trabalhabilidade das misturas, com ou sem resíduo. As argamassas com o traço 1: 2,5 apresentaram maior trabalhabilidade, pela redução do teor de agregado e preservação da relação a/c. As argamassas com apenas agregado natural apresentaram uma maior trabalhabilidade. Nas argamassas com o traço 1: 2,5 não houve alteração na trabalhabilidade das argamassas quando substituído o agregado natural por agregado leve ou por agregado reciclado, apresentando, em todos os casos, trabalhabilidade semelhante (em torno de 175 mm).

A substituição de 100 % da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia afetou o índice de consistência das argamassas, nos dois traços. No traço 1: 3, a presença do resíduo resultou no aumento da trabalhabilidade, pois os finos presentes no resíduo auxiliaram para uma melhor rolagem dos agregados. Enquanto que, com o traço 1: 2,5, a presença do resíduo resultou na redução da trabalhabilidade.

Para as argamassas produzidas com o traço 1: 3, o consumo de cimento das argamassas foi superior quando utilizado 100 % do agregado natural, com a substituição parcial pelo agregado reciclado houve uma leve redução. Essa redução foi mais pronunciada quando realizada a substituição parcial do agregado natural pelo agregado leve, como também, auxiliou na redução da trabalhabilidade dessas argamassas. Já, nas argamassas com o traço 1: 2,5 o consumo de cimento das argamassas com apenas agregado natural e das argamassas com substituição parcial do agregado natural por agregado reciclado permaneceram praticamente iguais, em torno de 570 kg/m^3 , enquanto as argamassas com agregado leve reduziram para em torno de 540 kg/m^3 .

Nas argamassas com 100 % de resíduo de galvanoplastia em substituição a água de amassamento, a presença do teor superior de resíduo aumentou o consumo de cimento nas argamassas com o traço 1: 3 e reduziu nas argamassas com o traço 1: 2,5, quando comparada com as argamassas com 8,5 % de resíduo. O consumo de cimento foi influenciado pelo traço utilizado e pela origem do material.

Propriedades físicas das argamassas fabricadas com lodo.

	Material/ Argamassas	γ (g/cm ³)	Teor de ar in- corporado (%)	Flow (mm)	Consumo de cimento (kg/m ³)	
8,5 % DE LODO	TRAÇO 1 : 3	REF-AN	2,18	7,0	140,0	494,1
		REF-ALV	1,63	29,7	108,0	408,3
		ALV + SAT	1,65	28,8	108,0	413,2
		REF-RCC	2,03	13,2	125,0	461,8
		RCC + SAT	2,10	10,0	123,5	478,8
		AN + LODO	2,21	5,8	163,5	500,5
	TRAÇO 1 : 2,5	ALV + LODO	1,61	30,7	106,0	402,4
		ALV+ LODO+ SAT	1,66	28,5	106,0	415,0
		RCC + LODO	2,11	9,8	128,0	479,5
		RCC+ LODO+ SAT	2,09	10,5	117,0	475,7
		REF-AN	2,23	3,8	218,5	568,4
		REF-ALV	1,89	17,1	171,0	531,5
100% LODO	1 : 3	ALV + SAT	1,93	15,7	178,0	540,6
		REF-RCC	2,24	2,7	185,5	575,2
		RCC + SAT	2,23	3,3	193,0	571,6
		AN + LODO	2,24	3,3	210,0	571,4
		ALV + LODO	1,92	15,9	173,5	538,9
		ALV+ LODO+ SAT	1,96	14,0	176,5	551,2
1 : 2,5	RCC + LODO	2,23	3,2	178,0	572,7	
	RCC+ LODO+ SAT	2,22	3,6	178,5	570,2	
	AN + LODO	2,22	4,4	182,0	564,9	
	ALV + LODO	1,84	19,5	128,5	516,4	
	RCC + LODO	2,19	5,1	151,0	561,2	
	AN + LODO	2,11	10,0	140,5	478,2	
	ALV + LODO	1,58	31,7	111,0	396,6	
	RCC + LODO	1,93	17,5	112,0	438,7	

Nota: γ = Massa específica; Flow = índice de consistência; REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente.

CALOR DE HIDRATAÇÃO - PASTAS DE CIMENTO

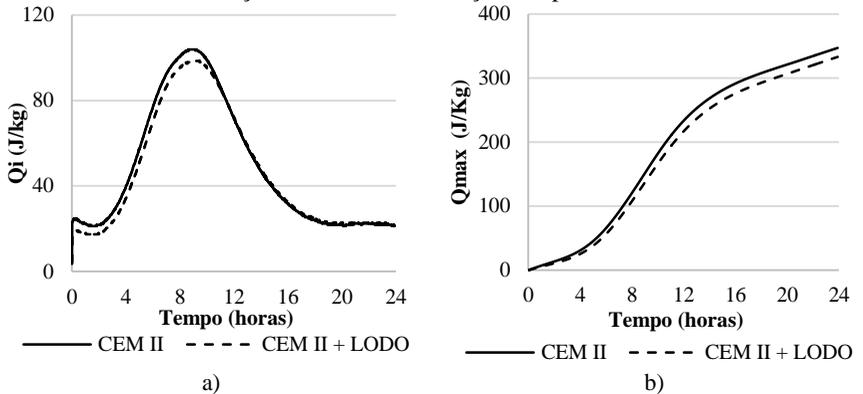
Foi avaliado o calor de hidratação da pasta de cimento e da pasta de cimento com 8,5 % de resíduo de galvanoplastia em relação ao teor total de água, relação a/c 0,42. A substituição parcial (8,5 %) da água de amassamento pelo resíduo pouco influenciou nos resultados, uma vez que, as curvas de evolução de calor das pastas de cimento em função do tempo ficaram praticamente iguais, com uma pequena redução no calor gerado (5 %) e no grau de hidratação (4 %) das pastas com lodo.

Dados do ensaio de calor de hidratação das pastas de cimento.

Material/ Argamassas	Início pega (h:min)	Fim pega (h:min)	Δt (h:min)	Max Qi (J/kg)	$Q_{\text{máx}}$ (J/kg)	α (%)
CEM II	03:15	07:07	03:52	103,87	347,03	84,8
CEM II + LODO	03:19	07:20	04:01	98,49	333,05	81,4

Nota: Max Qi= Máximo calor gerado; $Q_{\text{máx}}$ = Calor total gerado; α = grau de hidratação.

Curva da evolução de calor de hidratação das pastas de cimento.



PROPRIEDADES FÍSICAS – ESTADO ENDURECIDO

Na Tabela abaixo são apresentados os resultados das propriedades físicas no lodo solidificado. Os resultados de massa específica das argamassas com 28 dias não foram influenciadas pela incorporação de 8,5 % ou 100 % de lodo, pela realização da molhagem prévia dos agregados ou pela substituição parcial do AN por RCC. Porém, foram influenciadas pela substituição parcial do AN por ALV devido à menor massa específica dos agregados. A porosidade aberta e a absorção por imersão não foram influenciadas pela incorporação de 8,5 % de resíduo. A absorção por imersão foi influenciada, pelas características do agregado utilizado, ou seja, quando incorporado ALV, aumentou a absorção. A porosidade aberta, em todos os casos, ficou praticamente igual, não sendo alterada pelo teor de cimento utilizado e pela realização da molhagem prévia. Já, nas argamassas com 100 % de lodo, a absorção por imersão e a porosidade aberta não foram influenciadas pelo traço nem pelo agregado utilizado. Em paralelo, a absorção e a porosidade aberta foram reduzidas quando utilizado 100 % de resíduo.

Propriedades físicas no estado endurecido.

		Material	γ (g/cm ³)	Absorção por imersão (%)	Porosidade aberta (%)
8,5 % DE LODO	TRAÇO 1 : 3	REF-AN	2,32	7,0	15,1
		REF-ALV	1,97	8,5	15,5
		ALV + SAT	1,93	8,4	15,9
		REF-RCC	2,32	7,0	15,2
		RCC + SAT	2,30	7,2	15,4
		AN + LODO	2,34	7,2	15,6
	TRAÇO 1 : 2,5	ALV + LODO	1,94	8,5	15,5
		ALV+ LODO+ SAT	1,93	8,5	15,6
		RCC + LODO	2,34	7,2	15,4
		RCC+ LODO+ SAT	2,34	7,1	15,3
		REF-AN	2,32	7,4	16,0
		REF-ALV	1,91	9,7	17,4
100% LODO	1 : 3	ALV + SAT	2,06	12,8	22,1
		REF-RCC	2,31	8,0	17,0
		RCC + SAT	2,32	11,0	22,1
	1:2,5	AN + LODO	2,29	7,3	15,8
		ALV + LODO	1,96	9,7	17,7
		ALV+ LODO+ SAT	2,04	9,5	17,7
1:2,5	RCC + LODO	2,30	7,7	16,6	
	RCC+ LODO+ SAT	2,27	7,9	16,9	
	1 : 3	AN + LODO	2,30	7,2	15,5
ALV + LODO		2,05	9,1	16,5	
RCC + LODO		2,32	7,4	15,8	
1:2,5	AN + LODO	2,33	7,8	16,7	
	ALV + LODO	1,86	9,3	16,8	
	RCC + LODO	2,33	8,3	17,5	

Nota: γ = massa específica; REF = referência; LODO = resíduo de galvanoplastia.

RESISTÊNCIA MECÂNICA

Na Tabela abaixo são apresentados os resultados da resistência à compressão e o aumento proporcional da resistência ao longo do tempo. A utilização de 8,5 % e 100 % de resíduo de galvanoplastia não influenciou significativamente nas resistências das argamassas, em ambos os traços utilizados. Devido à ausência de finos na curva granulométrica utilizada (frações 0,15 a 2,4 mm e os agregados ainda foram lavados antes da utilização) os finos do resíduo serviram como *filer*, preenchendo os espaços vazios e auxiliando para não aumentar a porosidade das argamassas pela interferência com o resíduo e o cimento e, com isso, as argamassas com 100 % de resíduo não apresentaram um decréscimo significativo da resistência. Nos dois traços (1: 3 e 1: 2,5), com satura-

ção prévia houve aumentos de resistência em idades médias a tardias (28 e 90 dias), assim como o aumento proporcional da resistência dessas argamassas foram superiores de 3 para 28 dias, principalmente, em relação às argamassas preparadas sem saturação prévia. Isso ocorreu, pois os agregados leves e reciclados foram capazes de realizar a saturação prévia, liberando a água do seu interior em idades tardias, contribuindo para a melhor hidratação ao longo do tempo. A resistência foi, significativamente, afetada pela utilização do agregado leve, ou seja, as características dos agregados como massa específica, absorção, porosidade e resistência, influenciaram mais nas propriedades finais das argamassas que o teor de resíduo utilizado. Por outro lado, a redução da resistência das argamassas com agregado leve em REF-AN pode ter sido causada pela presença de sulfato nos agregados, uma vez que o sulfato pode reagir com aluminato tricálcico e com hidróxido de cálcio formando compostos expansivos, os quais apresentam maior propensão a fissurar dentro da estrutura impactando na resistência à compressão do material (PINTO, 2005).

Resultados do ensaio de resistência à compressão.

	Material	Resistência à compressão (MPa)			Aumento da resistência (%)		
		3 dias	28 dias	90 dias	3 para 28 d	28 para 90 d	
8,5 % DE LODO	TRAÇO 1 : 3	REF-AN	52,0	63,5	66,7	22,2	5,0
		REF-ALV	38,6	43,6	44,1	13,1	1,2
		ALV + SAT	27,9	42,3	47,0	51,6	11,1
		REF-RCC	48,6	60,4	64,3	24,3	6,4
		RCC + SAT	44,1	61,7	65,3	39,8	5,9
		AN + LODO	46,8	61,6	63,0	31,6	2,3
		ALV + LODO	35,2	41,6	45,4	18,4	9,1
		ALV+ LODO+ SAT	36,7	40,1	43,2	9,4	7,6
		RCC + LODO	48,7	60,0	61,5	23,2	2,5
	RCC+ LODO+ SAT	50,0	61,3	62,8	22,6	2,5	
	TRAÇO 1 : 2,5	REF-AN	51,1	65,7	73,9	28,6	12,6
		REF-ALV	37,4	44,8	47,2	19,7	5,5
		ALV + SAT	37,9	50,9	53,0	34,5	4,0
		REF-RCC	49,5	62,1	69,2	25,6	11,5
		RCC + SAT	50,1	68,7	70,9	37,1	3,1
		AN + LODO	48,2	68,7	76,0	42,5	10,7
		ALV + LODO	36,9	45,3	47,9	22,9	5,9
		ALV+ LODO+ SAT	38,0	47,6	47,8	25,2	0,4
RCC + LODO		50,0	63,9	68,0	27,9	6,4	
RCC+ LODO+ SAT	52,6	67,0	71,2	27,4	6,3		
100% LODO	1 : 3	AN + LODO	48,3	61,9	64,7	28,2	4,5
		ALV + LODO	32,0	36,5	38,9	14,1	6,5
		RCC + LODO	48,5	58,6	62,7	20,9	7,0
	1:2,5	AN + LODO	50,2	64,2	73,7	27,8	14,8
		ALV + LODO	35,6	46,8	51,9	31,2	11,1
		RCC + LODO	45,1	64,8	66,7	43,6	2,9

		Material	Desvio Padrão (MPa)		
			3 dias	28 dias	90 dias
8,5 % DE LODO	TRAÇO 1 : 3	REF-AN	0,60	1,40	1,03
		REF-ALV	0,29	1,85	1,75
		ALV + SAT	0,74	0,99	0,41
		REF-RCC	0,57	2,21	1,59
		RCC + SAT	0,63	1,59	1,01
		AN + LODO	1,15	0,89	2,15
		ALV + LODO	1,29	0,41	1,15
		ALV+ LODO+ SAT	0,11	1,04	1,15
		RCC + LODO	1,47	1,74	0,50
	RCC+ LODO+ SAT	2,92	1,52	2,63	
	TRAÇO 1 : 2,5	REF-AN	0,70	0,89	1,35
		REF-ALV	0,80	1,18	1,77
		ALV + SAT	0,94	6,22	2,16
		REF-RCC	0,59	2,64	2,21
		RCC + SAT	0,85	0,66	0,81
		AN + LODO	1,13	0,95	0,25
		ALV + LODO	0,50	2,60	0,81
		ALV+ LODO+ SAT	0,70	0,28	0,15
RCC + LODO		0,88	0,84	0,33	
RCC+ LODO+ SAT	0,98	1,74	1,44		
100% LODO	1 : 3	AN + LODO	0,91	0,52	2,25
		ALV + LODO	0,74	1,91	0,60
		RCC + LODO	1,52	1,23	0,85
	1:2,5	AN + LODO	1,29	1,15	0,68
		ALV + LODO	2,38	2,03	3,13
		RCC + LODO	0,69	1,14	1,72

Os resultados de resistência à tração na flexão e o aumento proporcional de uma idade para outra são abaixo. A substituição parcial da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia, nos dois traços, não influenciou na resistência à tração na flexão das argamassas. Assim como, quando utilizado 100 % de resíduo de galvanoplastia, ocorreu uma redução da resistência, porém, não significativa. Isso ocorreu pois, como comentando anteriormente, o resíduo de galvanoplastia funcionou como *filer*, preenchendo os espaços vazios e auxiliando para a melhora da resistência.

Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão.

	Material/ Argamassas	Resistência à tração na flexão (MPa)			Aumento da resistência (%)		
		3 dias	28 dias	90 dias	3 para 28 d	28 para 90 d	
8,5 % DE LODO	TRAÇO 1 : 3	REF-AN	7,1	9,4	9,9	32,9	5,6
		REF-ALV	6,6	7,4	8,0	11,6	8,2
		ALV + SAT	5,1	6,8	7,7	33,4	13,3
		REF-RCC	8,3	8,8	9,4	5,5	7,3
		RCC + SAT	6,6	9,0	11,2	35,7	24,4
		AN + LODO	8,1	8,7	10,9	6,4	25,3
		ALV + LODO	6,6	6,8	7,1	2,3	5,3
		ALV+ LODO+ SAT	6,4	7,6	8,3	19,6	9,2
		RCC + LODO	7,9	8,2	8,6	3,6	4,4
	RCC+ LODO+ SAT	8,4	8,8	10,8	5,1	22,0	
	TRAÇO 1 : 2,5	REF-AN	7,7	9,2	10,8	20,1	16,7
		REF-ALV	6,5	7,3	7,6	11,5	4,1
		ALV + SAT	5,8	6,7	8,1	16,9	19,7
		REF-RCC	7,8	8,4	9,5	8,0	12,0
		RCC + SAT	7,1	8,2	9,1	15,2	11,3
		AN + LODO	7,0	8,6	10,3	23,0	19,8
		ALV + LODO	6,4	6,8	8,3	5,4	22,5
		ALV+ LODO+ SAT	6,0	6,3	7,8	5,1	23,9
RCC + LODO		7,8	9,0	9,1	15,7	1,1	
RCC+ LODO+ SAT	7,0	7,7	10,1	11,0	30,5		
100% LODO	1 : 3	AN + LODO	7,3	8,4	8,6	15,3	1,8
		ALV + LODO	6,1	6,5	7,0	6,9	7,3
		RCC + LODO	7,3	8,2	8,7	12,3	5,9
	1:2,5	AN + LODO	8,1	9,1	9,4	11,9	3,1
		ALV + LODO	6,5	7,5	7,6	15,6	0,4
		RCC + LODO	7,2	9,1	9,5	26,5	4,3

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; LODO = resíduo de galvanoplastia.

		Material	Desvio Padrão (MPa)		
			3 dias	28 dias	90 dias
8,5 % DE LODO	TRAÇO 1 : 3	REF-AN	0,11	0,42	0,93
		REF-ALV	0,04	0,47	0,49
		ALV + SAT	0,07	0,00	0,15
		REF-RCC	0,69	0,08	0,98
		RCC + SAT	0,01	0,28	0,64
		AN + LODO	1,15	1,01	0,06
		ALV + LODO	0,06	0,28	0,08
		ALV+ LODO+ SAT	0,31	0,49	0,20
		RCC + LODO	0,28	0,04	0,62
	RCC+ LODO+ SAT	1,03	0,71	0,53	
	TRAÇO 1 : 2,5	REF-AN	0,27	0,60	0,45
		REF-ALV	0,00	1,37	0,43
		ALV + SAT	0,54	0,39	1,04
		REF-RCC	0,62	0,86	0,35
		RCC + SAT	0,75	0,56	0,02
		AN + LODO	0,47	0,26	0,32
		ALV + LODO	0,07	0,35	0,26
		ALV+ LODO+ SAT	0,70	0,27	0,20
RCC + LODO		0,59	0,16	0,00	
RCC+ LODO+ SAT	0,29	1,22	0,90		
100% LODO	1 : 3	AN + LODO	0,21	0,71	0,07
		ALV + LODO	0,42	0,08	0,69
		RCC + LODO	0,23	0,06	0,04
	1:2,5	AN + LODO	0,06	0,32	0,28
		ALV + LODO	0,06	0,49	0,45
		RCC + LODO	0,24	1,46	0,09

ENSAIO DE TANQUE – CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E pH

As argamassas que apresentaram a maior condutividade com o traço 1: 3 e com 8,5 % de substituição da água de amassamento por resíduo de galvanoplastia foram às amostras RCC+LODO e RCC+LODO+SAT. Com o traço 1: 2,5 e 8,5 % de resíduo de galvanoplastia a maior condutividade foi obtida na argamassa ALV+LODO+SAT. Corroborando com a liberação de metal nessas amostras, uma vez que apresentaram as maiores liberações, de acordo com a Tabela 60. Como também, de modo geral, as argamassas com o traço 1: 2,5 apresentaram a maior condutividade elétrica. Bem como, as argamassas com 100 % de resíduo de galvanoplastia com o traço 1: 3 e com traço 1: 2,5 aumentaram o valor de condutividade elétrica, quando comparada com as argamassas com 8,5 % de lodo.

Conductividade elétrica do líquido lixiviante após ensaio de tanque.

Material/ Argamassas	Conductividade elétrica de cada extração ($\mu\text{S}/\text{cm}$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8		
8,5 % DE LODO	TRAÇO 1:3	REF-AN	1154,0	1497,0	1421,0	1404,5	1690,0	1580,0	1401,0	1349,0
		REF-ALV	1119,0	1257,0	1240,0	1196,5	1549,5	1527,0	1475,5	1542,5
		REF-RCC	1082,0	1261,5	1201,0	1225,5	1499,5	1532,0	1461,5	1248,5
		AN + LODO	961,0	1195,5	1232,5	1205,5	1542,5	1457,0	1300,0	1125,0
		ALV + LODO	925,0	1114,5	1115,0	1137,0	1372,5	1447,5	1443,5	1561,0
		ALV+LODO+SAT	1153,0	1372,5	1173,0	1541,0	1834,5	1715,0	1961,5	1524,5
	TRAÇO 1:2,5	RCC + LODO	1397,0	1820,5	1505,5	1925,0	2100,0	1800,0	1959,0	1328,5
		RCC+LODO+SAT	1584,5	1871,0	1522,5	1866,5	2135,0	1831,0	1982,5	1278,5
		REF-AN	1154,0	1497,2	1420,5	1403,8	1689,3	1575,8	1401,2	1349,0
		REF-ALV	1119,0	1257,0	1239,8	1196,3	1548,5	1526,3	1476,8	1541,8
		REF-RCC	1081,2	1260,3	1200,2	1225,3	1497,8	1532,0	1459,2	1248,5
		AN + LODO	1586,8	1724,2	1915,8	1709,7	1931,5	1937,5	2044,0	1612,5
100% LODO	1:3	ALV + LODO	1277,5	1418,7	1520,7	1434,8	1737,2	1866,0	2425,0	1840,3
		ALV+LODO+SAT	1450,0	1472,8	1724,7	1639,3	2024,7	2201,7	3025,0	2092,0
		RCC + LODO	1495,5	1742,0	1896,2	1753,8	2072,5	1902,5	2425,0	1685,3
	1:2,5	RCC+LODO+SAT	1680,2	1871,3	2045,0	1866,7	2118,3	2084,7	2301,7	1804,3
		AN + LODO	1786,0	2173,3	2019,8	1907,3	1729,2	1684,2	1799,7	1068,0
		ALV + LODO	1602,3	1894,8	1747,2	1747,2	1675,5	1710,8	2120,0	1434,3
1:2,5	RCC + LODO	1746,7	2003,0	1856,5	1810,5	1722,0	1637,3	1949,7	1123,0	
	AN + LODO	1924,8	2186,7	2066,7	2056,3	1857,0	1856,5	2141,7	1190,0	
	ALV + LODO	1560,5	1788,3	1719,7	1717,7	1612,2	1660,2	1925,8	1317,3	
RCC + LODO	1566,7	1915,8	1934,2	1780,5	1610,3	1639,7	1836,7	1184,3		

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; LODO = resíduo de galvanoplastia.

Na Tabela abaixo são apresentados os resultados de pH das amostras ensaiadas em cada extração. Todos os valores ficaram semelhantes, não sendo influenciados pela presença do resíduo de galvanoplastia, pela realização da saturação prévia dos agregados, pela natureza do agregado utilizado e o traço utilizado.

pH do líquido lixiviante após cada extração do ensaio de tanque.

Material/ Argamassas		pH de cada extração							
		1	2	3	4	5	6	7	8
8,5 % DE LODO	REF-AN	11,61	11,72	11,69	12,09	11,78	11,77	11,92	11,79
	REF-ALV	11,59	11,68	11,61	12,05	11,74	11,77	11,96	11,85
	REF-RCC	11,56	11,69	11,67	12,05	11,75	11,77	11,95	11,76
	TRACO 1 : 3								
	AN + LODO	11,56	11,65	11,70	12,03	11,76	11,76	11,91	11,73
	ALV + LODO	11,58	11,65	11,65	12,02	11,71	11,76	11,97	11,88
	ALV+LODO+SAT	11,59	11,70	11,82	11,86	12,00	11,92	12,03	11,85
	RCC + LODO	11,70	11,84	11,95	11,99	12,09	11,97	12,06	11,82
	RCC+LODO+SAT	11,75	11,85	11,96	11,98	12,08	11,99	12,06	11,81
	TRACO 1 : 2,5								
	REF-AN	11,61	11,72	11,69	12,09	11,77	11,76	11,91	11,79
	REF-ALV	11,59	11,68	11,61	12,05	11,74	11,77	11,96	11,85
REF-RCC	11,56	11,68	11,67	12,05	11,75	11,77	11,95	11,76	
TRACO 1 : 3									
AN + LODO	11,95	12,02	11,97	11,95	11,96	12,06	11,97	11,88	
ALV + LODO	11,88	11,94	11,88	11,89	11,94	12,04	12,07	11,97	
ALV+LODO+SAT	11,93	11,96	11,94	11,95	12,00	12,13	12,19	12,02	
RCC + LODO	11,95	12,04	12,01	11,99	12,02	12,12	12,08	11,92	
RCC+LODO+SAT	12,01	12,07	12,03	12,01	12,02	12,13	12,07	11,94	
100% LODO									
TRACO 1 : 3									
AN + LODO	11,86	11,99	11,96	11,99	12,00	11,86	11,94	11,98	
ALV + LODO	11,84	11,97	11,93	11,99	12,01	11,90	12,03	12,17	
RCC + LODO	11,90	11,99	11,95	12,00	12,03	11,89	12,00	12,07	
TRACO 1 : 2,5									
AN + LODO	11,94	12,01	11,97	12,03	12,02	11,92	12,01	12,09	
ALV + LODO	11,86	11,94	11,90	11,98	11,98	11,89	11,99	12,15	
RCC + LODO	11,87	11,98	11,94	12,00	11,99	11,89	11,98	12,12	

Nota: REF = referência; AN = areia padrão; RCC = agregado reciclado; ALV = agregado leve; SAT = saturado previamente; LODO = resíduo de galvanoplastia.

9.4 APÊNDICE 4: TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

TRAÇO 1: 3 COM 8,5 % DE RESÍDUO DE GALVANOPLASTIA

ANOVA - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Resistência à compressão – 3 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Resíduo de galvanoplastia	4,05	1	4,05	0,23	7,7086	Não
Agregado + condição	483,11	4	120,78	6,79	6,3882	Sim
Resíduo	71,19	4	17,80			
Total	558,35	9				
Resistência à compressão – 28 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Resíduo de galvanoplastia	6,64	1	6,64	7,06	7,7086	Não
Agregado + condição	940,00	4	253,00	249,89	6,3882	Sim
Resíduo	3,76	4	0,94			
Total	950,40	9				
Resistência à compressão – 90 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Resíduo de galvanoplastia	11,69	1	11,69	4,44	7,7086	Não
Agregado + condição	883,98	4	221,00	84,03	6,3882	Sim
Resíduo	10,52	4	2,63			
Total	906,19	9				

ANOVA - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Resistência à tração na flexão – 3 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Resíduo de galvanoplastia	1,37	1	1,37	3,51	7,7086	Não
Agregado + condição	7,16	4	1,79	4,57	6,3882	Não
Resíduo	1,57	4	0,39			
Total	10,10	9				
Resistência à tração na flexão – 28 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Resíduo de galvanoplastia	0,17	1	0,17	0,90	7,7086	Não
Agregado + condição	7,07	4	1,77	9,61	6,3882	Sim
Resíduo	0,74	4	0,18			
Total	7,98	9				
Resistência à tração na flexão – 90 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Resíduo de galvanoplastia	0,04	1	0,04	0,11	7,7086	Não
Agregado + condição	17,61	4	4,40	13,13	6,3882	Sim
Resíduo	1,37	4	0,34			
Total	18,99	9				

NOTA: ^a Se o valor F_u foi inferior a F , então o efeito possui impacto significativo na resistência à compressão (com 95 % de confiança).

TRAÇO 1: 2,5 COM 8,5 % DE RESÍDUO DE GALVANOPLASTIA**ANOVA - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

Resistência à compressão – 3 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Resíduo de galvanoplastia	0,01	1	0,01	0,00	7,7086	Não
Agregado + condição	391,40	4	97,85	51,64	6,3882	Sim
Resíduo	7,58	4	1,89			
Total	398,98	9				
Resistência à compressão – 28 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Resíduo de galvanoplastia	0,28	1	0,28	0,10	7,7086	Não
Agregado + condição	890,67	4	222,67	75,50	6,3882	Sim
Resíduo	11,80	4	2,95			
Total	902,75	9				
Resistência à compressão – 90 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Resíduo de galvanoplastia	1,03	1	1,03	0,26	7,7086	Não
Agregado + condição	1271,27	4	371,82	81,78	6,3882	Sim
Resíduo	15,54	4	3,89			
Total	1287,84	9				

ANOVA - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Resistência à tração na flexão – 3 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Resíduo de galvanoplastia	0,05	1	0,05	0,84	7,7086	Não
Agregado + condição	4,62	4	1,16	20,03	6,3882	Sim
Resíduo	0,23	4	0,06			
Total	4,90	9				
Resistência à tração na flexão – 28 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Resíduo de galvanoplastia	0,20	1	0,20	1,58	7,7086	Não
Agregado + condição	8,89	4	2,22	17,79	6,3882	Sim
Resíduo	0,50	4	0,12			
Total	9,59	9				
Resistência à tração na flexão – 90 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F\alpha_{0,05}^a$	Afeta?
Resíduo de galvanoplastia	0,05	1	0,05	0,19	7,7086	Não
Agregado + condição	10,19	4	2,55	10,49	6,3882	Sim
Resíduo	0,97	4	0,24			
Total	11,21	9				

NOTA: ^a Se o valor $F\alpha$ foi inferior a F, então o efeito possui impacto significativo na resistência à compressão (com 95 % de confiança).

100 % DE RESÍDUO DE GALVANOPLASTIA**ANOVA - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

Resistência à compressão – 3 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F_{\alpha,0,05}^a$	Afeta?
Traço	0,76	1	0,76	0,11	18,5128	Não
Agregado + resíduo	275,30	2	137,65	20,83	19,0000	Sim
Resíduo	13,22	2	6,61			
Total	289,28	5				
Resistência à compressão – 28 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F_{\alpha,0,05}^a$	Afeta?
Traço	58,05	1	58,05	7,31	18,5128	Não
Agregado + resíduo	575,45	2	287,72	36,25	19,0000	Sim
Resíduo	15,87	2	7,94			
Total	649,37	5				
Resistência à compressão – 90 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F_{\alpha,0,05}^a$	Afeta?
Traço	112,10	1	112,10	10,81	18,5128	Não
Agregado + resíduo	638,04	2	319,02	30,77	19,0000	Sim
Resíduo	20,74	2	10,37			
Total	770,87	5				

ANOVA - RESISTÊNCIA À TRACÇÃO NA FLEXÃO

Resistência à tração na flexão – 3 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F_{\alpha,0,05}^a$	Afeta?
Traço	0,25	1	0,25	2,30	18,5128	Não
Agregado + resíduo	2,13	2	1,07	9,95	19,0000	Não
Resíduo	0,21	2	0,11			
Total	2,59	5				
Resistência à tração na flexão – 28 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F_{\alpha,0,05}^a$	Afeta?
Traço	1,19	1	1,19	64,58	18,5128	Sim
Agregado + resíduo	3,85	2	1,92	104,18	19,0000	Sim
Resíduo	0,04	2	0,02			
Total	5,08	5				
Resistência à tração na flexão – 90 dias						
Efeito	SQ	GL	MQ	F	$F_{\alpha,0,05}^a$	Afeta?
Traço	0,86	1	0,86	124,60	18,5128	Sim
Agregado + resíduo	4,18	2	2,09	304,54	19,0000	Sim
Resíduo	0,01	2	0,01			
Total	5,05	5				

NOTA: ^a Se o valor F_{α} foi inferior a F, então o efeito possui impacto significativo na resistência à compressão (com 95 % de confiança).