

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

JULIANA GUERRA SGORLON

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA GALVANOTÉCNICA NO  
DESENVOLVIMENTO E FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA  
PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA**

MARINGÁ

2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

JULIANA GUERRA SGORLON

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA GALVANOTÉCNICA NO  
DESENVOLVIMENTO E FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA  
PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA**

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dra. Célia Regina Granhen Tavares

Co-orientador: Prof<sup>º</sup> Dr. Carlos Humberto Martins

Tese de Doutorado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá, como um dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração: Desenvolvimento de Processos (linha de pesquisa: Gestão, controle e preservação ambiental).

MARINGÁ

2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Esta é a versão da Tese de Doutorado apresentada por Juliana Guerra Sgorlon perante a Comissão Julgadora do Curso de Doutorado em Engenharia Química em 12 de agosto de 2014.

COMISSÃO JULGADORA

Profª Drª Célia Regina Granhen Tavares  
Orientadora / Presidente

Prof. Dr. Carlos Humberto Martins  
Coorientador

Prof. Dr. Cesar Fabiano Fioriti  
Membro

Profª Drª Eurica Mary Nogami  
Membro

Profª Drª Cláudia Telles Benatti  
Membro

Drª Elenice Tavares Abreu  
Membro

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

S523u Sgorlon, Juliana Guerra  
Utilização de resíduos da indústria galvanotécnica  
no desenvolvimento e fabricação de blocos de  
concreto para pavimentação intertravada/ Juliana  
Guerra Sgorlon. -- Maringá, 2014.  
184 f. : il. color., figs., tabs., retrs.

Orientador : Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Célia Regina Granhen  
Tavares.

Coorientador : Prof. Dr. Carlos Humberto Martins  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de  
Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de  
Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Química, 2014.

1. Blocos de concreto - Resíduos industriais -  
Utilização. 2. Blocos de concreto - Indústria  
galvânica - Fabricação. 3. Blocos de concreto -  
Tratamento e aproveitamento. I. Tavares, Célia  
Regina Granhen, orient. II. Martins, Carlos  
Humberto, coorient. II. Universidade Estadual de  
Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de  
Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Química. III. Título.

CDD 21.ed.666.895

Zss-2089

“Quando a última árvore tiver caído,  
Quando o último rio tiver secado,  
Quando o último peixe for pescado,  
Vocês vão entender que dinheiro não se come.”

*Greenpeace*

## AGRADECIMENTOS

*Graças à Deus hoje tenho muito mais a agradecer do que pedir...*

Agradeço à *Ele* todos os dias pela força que me emprestou pra chegar até aqui!

Agradeço ao meu marido/namorado/companheiro/amigo *Flávio* por me amar ao longo desses nove anos de relacionamento e principalmente nesses três anos e meio de doutorado... por me aguentar quando nem mesmo eu me suportava, por me consolar quando eu mais precisava e agora mais do que nunca, colher comigo os frutos da vitória!

Agradeço imensamente aos meus *pais e irmã* pelo apoio e por terem sempre me indicado a direção certa.

Agradeço a minha orientadora *Prof<sup>a</sup> Célia* mais uma vez pela oportunidade, confiança e pelos cinco anos e meio de convivência. Ao longo desses anos suas broncas e críticas foram de suma importância para meu crescimento profissional, afinal, não se faz homens de bem apenas com elogios.

Agradeço ao *peçoal do Laboratório de Construção Civil da UEM (P02)*, em especial ao amigo *Valter* por me acolher e me ajudar imensamente no desenvolvimento do meu trabalho.

Agradeço ao *peçoal da Fábrica de Artefatos da UEM* pela disponibilidade e ajuda na fabricação das peças, também pelas risadas e conversas jogadas fora!

Agradeço a todos os profissionais da UEM, COMCAP e do Departamento de Engenharia Química que direta e indiretamente contribuíram para que esta tese fosse concluída, em especial, obrigada *Elenice, Luizinho, Orisvaldo e Marilza*.

E por fim, agradeço aos amigos... que levarei para sempre em meu coração. *Janaína, Renata, Rosane, Valquíria, Paulo, Fernanda e Junior*. Sem as risadas de vocês a caminhada teria sido muito mais difícil!

# **UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA GALVANOTÉCNICA NO DESENVOLVIMENTO E FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA**

AUTORA: JULIANA GUERRA SGORLON

ORIENTADORA: PROF<sup>a</sup> DRa. CÉLIA REGINA GRANHEN TAVARES

CO-ORIENTADOR: PROF<sup>o</sup> DR. CARLOS HUMBERTO MARTINS

Tese de Doutorado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química; Universidade Estadual de Maringá; Av. Colombo, 5790, Bl. E-46; CEP: 87020-900 Maringá-PR, Brasil, defendido em 12 de agosto de 2014. 184p.

## **RESUMO**

O presente trabalho teve como objetivo o estudo do tratamento/reaproveitamento de resíduos sólidos provenientes da indústria de galvanoplastia na fabricação de blocos de concreto para a pavimentação, utilizando-se a técnica de estabilização/solidificação em matrizes de cimento. Foram confeccionados blocos de concreto com diferentes teores de resíduos (poeira de jateamento e lodo galvânico) 2%, 3%, 4%, 5% e 10% em substituição ao agregado miúdo. Esses blocos, posteriormente, foram submetidos a ensaios físicos, químicos, mecânicos e microestruturais para a avaliação, tanto das características necessárias à garantia de boa qualidade dos blocos, quanto para a garantia de uma eficiente remoção/imobilização dos contaminantes presentes nos resíduos. Os resultados obtidos permitiram verificar que a substituição do agregado miúdo por até 5% de poeira de jateamento e 4% de lodo galvânico não acarretou em perdas significativas na resistência mecânica das peças, nem levou ao aumento da absorção de água pelos blocos. Verificou-se ainda, por meio de ensaios químicos, que não haverá problemas de lixiviação ou solubilização de contaminantes no ambiente durante a vida útil dos blocos de concreto, uma vez que o processo de solidificação/estabilização levou à imobilização física e química dos resíduos na massa de cimento. Dessa forma, a utilização da poeira de jateamento e do lodo de galvanoplastia na fabricação de blocos de concreto para pavimentação mostrou-se viável e eficaz, apresentando-se não só como uma alternativa para o reaproveitamento e tratamento adequado desses resíduos, mas também como uma possibilidade de economia de matérias-primas utilizadas no ramo da construção civil.

**UTILIZATION OF ELECTROPLATING WASTE IN THE DEVELOPMENT  
AND MANUFACTURING OF INTERLOCKED CONCRETE PAVING  
BLOCKS**

AUTHOR: JULIANA GUERRA SGORLON

SUPERVISOR: CÉLIA REGINA GRANHEN TAVARES

Doctorate Thesis; Chemical Engineering Post-Graduate Program; State University of Maringá; 5790, Colombo Avenue, BL E46-09; CEP: 87020-900 – Maringá – PR, Brazil, presented on August 12<sup>th</sup>, 2014. 184 p.

**ABSTRACT**

The present work aimed to study the treatment/recycling of solid waste from the electroplating industry in the manufacture of concrete paving blocks, using the technique of stabilization/solidification in cement. Concrete blocks with different residues (blasting dust and galvanic sludge) (2%, 3%, 4%, 5% and 10%) in the substitution of fine aggregate were prepared. The blocks were subjected to physical, chemical, mechanical and microstructural tests for the assessment required to ensure good quality of the blocks, as for ensuring efficient removal/immobilization of contaminants in waste. The results obtained showed that the replacement of fine aggregate by up to 5% of blasting dust and 4% of galvanic sludge did not result in significant losses in the mechanical strength of the parts, nor lead to increased water absorption by the blocks. It has been found by chemical tests, there will be no problems of solubilization or leaching of contaminants during the useful life of the concrete blocks, since the process of solidification/stabilization led to physical and chemical immobilization of waste in cement mass. Thus, the use of blasting dust and electroplating sludge in manufacturing concrete paving blocks was feasible and effective, not only presenting itself as an alternative for the recycling and proper waste treatment, but also as a possibility of raw materials economy in the construction business.

## LISTA DE FIGURAS

Figura II.1 – Classificação dos resíduos sólidos quanto a sua periculosidade (Fonte: ABNT NBR 10004, 2004).....	8
Figura II.2 – Processo de galvanoplastia em bijuterias: (a) cubas eletrolíticas utilizadas e (b) imersão das peças no banho de eletrólito (Fonte: INFOJÓIAS, 2012). .....	18
Figura II.3 – Fluxograma de um processo de uma planta galvanoplastia (adaptada de LOU e HUANG, 2006). .....	20
Figura II.4 – Pontos de geração de poluentes no processo de galvanoplastia.....	21
(adaptado INTEC, 2001 <i>apud</i> TELOEKEN, 2011). .....	21
Figura II.5 – (a) Microesferas de vidro e (b) processo de jateamento de peças (Fonte: ATLASINOX e MICROESFERA, 2012) .....	23
Figura II.6 – Principais produtos da hidratação do cimento (adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2008).....	33
Figura II.7 – Hidratação do cimento e o aprisionamento de contaminantes (adaptado de CONNER, 1990) .....	35
Figura II.8 – Diferentes formas, cores e padrões de assentamento dos blocos de concreto para pavimentação (Fonte: INTERPAVI, 2012) .....	39
Figura II.9 – Pavimentação de calçadas e estacionamento com blocos de concreto (Fonte: Arquivo pessoal da autora) .....	41
Figura II.10 – Máquina vibro-prensa com desforma sobre paletes (Fonte: Arquivo pessoal da autora) .....	44
Figura III.1 – Recipientes para acondicionamento dos resíduos .....	56
Figura III.2 – (a) Poeira de jateamento e (b) lodo de galvanoplastia .....	56
Figura III.3 – Distribuição granulométrica da poeira de jateamento.....	61
Figura III.4 – Distribuição granulométrica do lodo de galvanoplastia.....	62
Figura III.5 – Difratoograma da poeira de jateamento .....	67
Figura III.6 – Difratoograma do lodo de galvanoplastia .....	68
Figura III.7 – Microscopia eletrônica de varredura de amostras de poeira de jateamento: (a) e (b) ampliação 500 vezes, 20 $\mu\text{m}$ (c) ampliação 2400 vezes, 5 $\mu\text{m}$ (c) ampliação 4500 vezes, 5 $\mu\text{m}$ .....	69

Figura III.8 – Microscopia eletrônica de varredura de amostras de lodo de galvanoplastia: (a) ampliação 450 vezes, 50 $\mu\text{m}$ (b) ampliação 1000 vezes, 10 $\mu\text{m}$ (c) ampliação 3000 vezes, 5 $\mu\text{m}$ (d) ampliação 7000 vezes, 2 $\mu\text{m}$ .....	70
Figura IV.1 - Betoneira autocarregável utilizada na fabricação dos blocos .....	78
Figura IV.2 – (a) vibro-prensa pneumática e (b) desforma dos blocos em paletes .....	78
Figura IV.3 – (a) Prensa hidráulica e (b) bloco preparado para o ensaio de compressão .....	80
Figura IV.4 – Ensaio de absorção de água: (a) secagem dos pavers em estufa e (b) pavers imersos no tanque de água para saturação .....	82
Figura IV.5 – Agitador rotativo de frasco utilizado nos ensaios de lixiviação .....	84
Figura IV.6 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	87
Figura IV. 7 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	88
Figura IV.8 – Difratoograma de uma amostra de cimento CP V - ARI.....	90
Figura IV.9 – Microscopia eletrônica de varredura de uma amostra de cimento CP V - ARI (ampliação 1500 vezes, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	91
Figura IV.10 - Difratoogramas de raios-x dos blocos fabricados com poeira de jateamento, (a) referência, (b) 2%, (c) 3%, (d) 4%, (e) 5%, (f) 10% .....	108
Figura IV.11 - Difratoogramas de raios-x dos blocos fabricados com respectivamente, (a) 2% (b) 3%, (c) 4%, (d) 5%, (e) 10% de lodo galvânico .....	113
Figura IV.12 – Resistência média à compressão aos 28 dias de cura dos blocos fabricados com poeira de jateamento .....	116
Figura IV.13 – Resistência à compressão aos 28 dias de cura dos blocos fabricados com lodo galvânico .....	118
Figura IV.14 – Absorção de água, aos 28 dias de cura, dos blocos fabricados com poeira de jateamento.....	120
Figura IV.15 – Absorção de água, aos 28 dias de cura, dos blocos fabricados com lodo galvânico.....	121
Figura IV.16 – Diagrama de dispersão para a resistência à compressão x absorção de água dos blocos fabricados com poeira de jateamento.....	123
Figura IV.17 – Diagrama de dispersão para a resistência à compressão x absorção de água dos blocos fabricados com lodo galvânico .....	124

Figura IV. 18 - Microscopia eletrônica de varredura de amostras dos blocos de concreto sem adição de resíduo: (a) ampliação de 50 vezes, (b) ampliação 800 vezes, (c) ampliação 6000 vezes e (d) ampliação 20000 vezes .....	126
Figura IV. 19 - Microscopia eletrônica de varredura de amostras dos blocos de concreto contendo 5% de poeira de jateamento: (a) ampliação de 50 vezes, (b) ampliação 800 vezes, (c) ampliação 6000 vezes e (d) ampliação 20000 vezes.....	127
Figura IV. 20 - Microscopia eletrônica de varredura de amostras dos blocos de concreto contendo 4% de lodo galvânico: (a) ampliação de 50 vezes, (b) ampliação 800 vezes, (c) ampliação 6000 vezes e (d) ampliação 20000 vezes .....	129
Figura V.1 – Momento de dosagem e mistura do concreto para fabricação dos blocos .....	134
Figura V.2 – Momento da moldagem, cura e transporte dos blocos .....	135
Figura V.3 – Equipamento de ensaio de abrasão CIENTEC (VIECILLI, 2004) .....	137
Figura V.4 - Difratogramas de raios-x dos blocos fabricados com resíduos galvânicos, (a) referência, (b) 5% de poeira de jateamento, (c) 4% de lodo galvânico .....	142
Figura V.5 – Resistência à compressão dos blocos fabricados industrialmente .....	144
Figura V.6 – Absorção de água dos blocos fabricados industrialmente.....	147

## LISTA DE TABELAS

Tabela II.1- Geração de resíduos industriais no Brasil (Parcial).....	11
Tabela II.2 – Descarte irregular de resíduos perigosos e seus impactos .....	12
Tabela II.3 - Resíduos industriais tratados no Brasil.....	13
Tabela II.4- Quantidades de RSI tratados e tecnologias utilizadas no Brasil.....	14
Tabela II.5 – Códigos e tipos de tratamento para resíduos sólidos industriais.....	27
Tabela II.6 – Exemplos de aplicação da técnica de estabilização/solidificação em matrizes de cimento. ....	30
Tabela II.7 – Requisitos da norma BS EN - 1338 (2003) .....	47
Tabela II.8 – Requisitos das normas ASTM – C 936/1996 e CSA A231.2 – 95/1995. .	48
Tabela II.9 – Requisitos para a produção de blocos de concreto para pavimentação ....	50
Tabela III.1 – Condições de ajuste do espectrômetro de absorção atômica .....	58
Tabela III.2 – Análise granulométrica da poeira de jateamento.....	60
Tabela III.3 – Análise granulométrica do lodo de galvanoplastia.....	62
Tabela III.4 – Características dos resíduos estudados .....	63
Tabela III.5 – Fluorescência de raios-x: porcentagem em massa dos compostos na composição dos resíduos .....	64
Tabela III.6 – Resultados dos índices de atividade pozolânica dos resíduos galvânico. 65	65
Tabela III.7 – Condições exigíveis para materiais pozolânicos segundo ABNT NBR 12653 (1992) .....	66
Tabela III.8 – Concentração média dos metais totais presente nos resíduos.....	71
Tabela III.9 – Concentração de contaminantes presentes no extrato lixiviado dos resíduos.....	72
Tabela III.10 - Concentração de contaminantes presentes no extrato solubilizado dos resíduos.....	73
Tabela IV.1 – Especificações cimento CP V - ARI .....	75
Tabela IV.2 – Traço referência.....	77
Tabela IV.3 – Traços utilizados na fabricação dos pavers com incorporação de resíduos .....	77
Tabela IV.4 – Fator multiplicativo “p” (NBR 9781, 2013).....	80
Tabela IV.5 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo .....	87
Tabela IV.6 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo .....	88

Tabela IV.7 – Porcentagem em massa dos compostos encontrados em amostras do cimento CP V – ARI.....	89
Tabela IV.8 – Concentração de metais presentes no cimento CP V - ARI.....	91
Tabela IV.9 – Concentração de contaminantes presentes no extrato lixiviado do cimento CP V - ARI.....	92
Tabela IV.10 – Concentração de contaminantes presentes no extrato solubilizado do cimento CP V - ARI.....	93
Tabela IV.11 – Concentração de contaminantes presentes no extrato lixiviado dos blocos fabricados com poeira de jateamento aos 28 dias de cura .....	94
Tabela IV.12 – Resumo da análise ANOVA para lixiviação dos blocos fabricados com poeira de jateamento.....	94
Tabela IV.13 - Concentração de contaminantes presentes no extrato solubilizado dos blocos fabricados com poeira de jateamento aos 28 dias de cura .....	95
Tabela IV.14 – Resumo da análise ANOVA para solubilização dos blocos fabricados com poeira de jateamento.....	96
Tabela IV.15 – Concentração de contaminantes presentes no extrato lixiviado dos blocos fabricados com lodo galvânico aos 28 dias de cura .....	96
Tabela IV.16 – Resumo da análise ANOVA para lixiviação dos blocos fabricados com lodo galvânico .....	97
Tabela IV.17 - Concentração de contaminantes presentes no extrato solubilizado dos pavers fabricados com lodo galvânico aos 28 dias de cura .....	98
Tabela IV.18 – Resumo da análise ANOVA para solubilização dos blocos fabricados com lodo galvânico.....	98
Tabela IV.19 – Valores de pH do extrato solubilizado dos blocos fabricados com resíduos galvânicos.....	100
Tabela IV.20 – Eficiência de retenção (Eretenção %) de metais lixiviados na matriz dos blocos fabricados com poeira de jateamento.....	101
Tabela IV.21 – Eficiência de retenção (Eretenção %) de metais lixiviados dos blocos fabricados com lodo galvânico.....	101
Tabela IV.22 - Eficiência de retenção (Eretenção %) de metais solubilizados na matriz dos blocos fabricados com poeira de jateamento .....	102
Tabela IV.23 - Eficiência de retenção (Eretenção %) de metais solubilizados na matriz dos blocos fabricados com lodo galvânico .....	103

Tabela IV.24 – Compostos cristalinos avaliados para as amostras solidificadas dos blocos fabricados com poeira de jateamento.....	105
Tabela IV.25 – Compostos cristalinos avaliados para as amostras solidificadas dos blocos fabricados com lodo galvânico .....	110
Tabela IV.26 – Porcentagem em massa dos compostos na composição dos blocos de concreto fabricados com poeira de jateamento.....	114
Tabela IV.27 – Porcentagem em massa dos compostos na composição dos blocos de concreto fabricados com lodo galvânico .....	115
Tabela IV.28 – Análise ANOVA para a resistência à compressão dos blocos fabricados com poeira de jateamento .....	116
Tabela IV.29 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos blocos fabricados com poeira de jateamento.....	117
Tabela IV.30 – Análise ANOVA para a resistência à compressão dos blocos fabricados com lodo galvânico.....	118
Tabela IV.31 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos blocos fabricados com lodo galvânico.....	119
Tabela IV.32 – Resistência à compressão e resistência característica à compressão dos blocos de concreto fabricados com resíduos galvânicos .....	119
Tabela IV.33 – Tabela ANOVA para a absorção de água dos blocos fabricados com poeira de jateamento.....	121
Tabela IV.34 – Análise ANOVA para a absorção de água dos blocos fabricados com lodo galvânico .....	121
Tabela IV.35 – Teste de Tukey para a absorção de água dos blocos fabricados com lodo galvânico.....	122
Tabela V.1 – Classificação granulométrica dos agregados miúdos empregados na fabricação industrial dos blocos de concreto para pavimentação.....	132
Tabela V.2 – Classificação granulométrica dos agregados graúdos empregados na fabricação industrial dos blocos de concreto para pavimentação.....	133
Tabela V.3 – Traços utilizados na fabricação industrial dos blocos com incorporação de resíduos.....	133
Tabela V.4 – Ensaios realizados e respectivos equipamentos e/ou metodologias utilizadas.....	136

Tabela V.5 – Concentração de contaminantes presentes no extrato lixiviado dos blocos aos 28 dias de cura.....	138
Tabela V.6 - Concentração de contaminantes presentes no extrato solubilizado dos blocos aos 28 dias de cura .....	138
Tabela V.7 – Eficiência de retenção (Eretenção %) de metais a partir do extrato lixiviado dos blocos.....	139
Tabela V.8 - Eficiência de retenção (Eretenção %) de metais a partir do extrato solubilizado na matriz dos blocos.....	139
Tabela V.9 – Compostos cristalinos avaliados para as amostras solidificadas dos blocos .....	140
Tabela V.10 – Porcentagem em massa dos compostos na composição dos blocos de concreto fabricados com resíduos galvânicos .....	143
Tabela V.11 – Tabela ANOVA para a resistência à compressão dos blocos aos 28 dias de cura.....	144
Tabela V.12 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos blocos aos 28 dias de cura .....	144
Tabela V.13 – Resistência à compressão e resistência característica à compressão dos blocos de concreto fabricados com resíduos galvânicos .....	146
Tabela V.14 – Tabela ANOVA para a absorção de água dos blocos aos 28 dias de cura .....	147
Tabela V.15 – Teste de Tukey para a absorção de água dos blocos aos 28 dias de cura .....	148
Tabela V.16 - Índice de desgaste / resistência à abrasão (mm).....	149
Tabela V.17 – Tabela ANOVA para o índice de desgaste/resistência à abrasão dos blocos.....	149

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais  
Ac - Acetileno  
A/G – Água/Aglomerante  
ANOVA – Analysis of Variance  
ARI – Alta Resistência Inicial  
ASTM – American Society for Testing and Materials  
BCP – Bloco de Concreto para Pavimentação  
C<sub>3</sub>A - Aluminato Tricálcico  
C<sub>3</sub>A.3CS.H<sub>32</sub> - Trissulfoaluminato de Cálcio (etringita)  
C<sub>4</sub>AF - Ferroaluminato Tetracálcico  
C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> - Aluminato de Cálcio Hidratado  
CBC – Cinza do Bagaço de Cana  
CCDM - Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais  
CEN - European Committee for Standardization  
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental  
CH – Hidróxido de Cálcio (portlandita)  
CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul  
COMCAP – Complexo Central de Apoio à Pesquisa  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
CP – Cimento Portland  
CPC – Cimento Portland Comum  
CSA – Canadian Standards Association  
C-S-H - Silicato de Cálcio Hidratado  
CS<sub>3</sub>H<sub>2</sub> – Sulfato de Cálcio Hidratado (gesso)  
C<sub>2</sub>S - Silicato Dicálcico  
C<sub>3</sub>S - Silicato Tricálcico  
d.m.s – diferença mínima significativa  
DRX - Difração de Raio-X

DTA – Differential Thermal Analysis  
EDTA - Ethylenediamine tetraacetic acid  
EPA – Environmental Protection Agency  
E/S – Estabilização/Solidificação  
FRX - Fluorescência de Raio-X  
GH – Gerador de Hidretos  
HF – Ácido fluorídrico  
IF – Índice de Forma  
ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa  
ISSMFE - International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering  
LAMIR - Laboratório de Análises de Minerais e Rochas  
LGCPA - Laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental  
MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura  
MMA – Ministério do Meio Ambiente  
NBR – Norma Brasileira Registrada  
n.d – não detectado  
NM – Norma Mercosul  
ON – Óxido Nitroso  
PET – Politereftalado de Etileno  
pH – Potencial Hidrogeniônico  
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos  
PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente  
RSI – Resíduos Sólidos Industriais  
SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná  
SESI – Serviço Social da Indústria  
UEL – Universidade Estadual de Londrina  
UEM – Universidade Estadual de Maringá  
UFC – Universidade Federal do Ceará  
UFSCAR - Universidade Federal de São Carlos  
USEPA – United States Environmental Protection Agency

**LISTA DE SÍMBOLOS**

A - Absorção total em porcentagem

$\alpha$  - Alfa

Ag - Prata

Al - Alumínio

As - Arsênio

Ba - Bário

Be - Berílio

C - Carbono

$C_{\text{bruto}}$  - Concentração do metal no extrato lixiviado/solubilizado do resíduo bruto

$C_{\text{tratado}}$  - Diferença entre a concentração do metal lixiviado/solubilizado nos blocos sem adição do resíduo (referência) e com adição do resíduo

Ca - Cálcio

Cd - Cádmi

Cl - Cloro

Co - Cobalto

Cr - Cromo

Cu - Cobre

$E_{\text{retenção}}$  - Eficiência de retenção

Fe - Ferro

$f_p$  - Resistência média das peças ensaiadas

$f_{pk}$  - Resistência característica à compressão

g - Grama

H - Hidrogênio

Hg - Mercúrio

K - Potássio

kg - Quilograma

kV - Quilovolts

L - Litro

mA - Miliamper

Mg - Magnésio

Mn - Manganês

mL – Mililitros

MPa – Megapascal

$M_1$  – Massa do corpo-de-prova seco

$M_2$  – Massa do corpo-de-prova saturado

Mo - Molibdênio

$\mu\text{m}$  – Micrometro

mg - Miligrama

N – Newton

Na – Sódio

Ni – Níquel

nm – Nanômetro

O – Oxigênio

P - Fósforo

Pb – Chumbo

ppm – Parte por milhão

rpm – Rotações por minuto

s – Segundo

S - Enxofre

Se – Selênio

Si - Silício

Sn – Estanho

Sr - Estrôncio

t – Coeficiente de student

$\theta$  – Teta

Ti – Titânio

V - Vanádio

Zn – Zinco

$^{\circ}\text{C}$  – Graus Celsius

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>1</b>
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Justificativa.....	3
1.2 Hipótese.....	4
1.3 Objetivo Geral .....	5
1.3.1 <i>Objetivos Específicos</i> .....	5
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>7</b>
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1 Problemática dos resíduos sólidos industriais.....	7
2.1.1 <i>Panorama Brasileiro</i> .....	11
2.2 Galvanoplastia.....	16
2.2.1 <i>Processo de galvanoplastia</i> .....	16
2.3 Resíduos da indústria galvanotécnica .....	20
2.3.1 <i>Poeira de jateamento</i> .....	23
2.3.2 <i>Lodo de galvanoplastia</i> .....	24
2.4 Tecnologias de tratamento de resíduos industriais.....	25
2.4.1 <i>Processos de estabilização/solidificação de resíduos sólidos</i> .....	28
2.5 Blocos de concreto para pavimentação (BCP).....	38
2.5.1 <i>Produção dos Blocos de Concreto para Pavimentação – Materiais, Equipamentos e Dosagem</i> .....	41
2.5.2 <i>Normas técnicas gerais sobre pavers</i> .....	45
2.6 Incorporação/reaproveitamento de resíduos sólidos industriais na construção civil.....	50
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>55</b>
3 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS GALVÂNICOS.....	55
3.1 Metodologia .....	55
3.1.2 <i>Coleta, preparo e acondicionamento</i> .....	55
3.1.3 <i>Caracterização físico-química e microestrutural</i> .....	56
3.2 Resultados e Discussão da caracterização dos resíduos.....	59
3.2.1 <i>Granulometria a laser, massa específica e pH</i> .....	60
3.2.2 <i>Fluorescência de raios-x (FRX)</i> .....	63
3.2.3 <i>Atividade pozolânica</i> .....	65
3.2.4 <i>Difração de raios-x (DRX)</i> .....	67
3.2.5 <i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i> .....	68
3.2.6 <i>Metais</i> .....	70
3.2.7 <i>Lixiviação e Solubilização</i> .....	71
3.3 Conclusões Parciais.....	73
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>75</b>
4 FABRICAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO EM ESCALA PILOTO.....	75
4.1 Metodologia .....	75
4.1.1 <i>Materiais utilizados</i> .....	75
4.1.2 <i>Determinação dos traços e proporcionamento dos materiais empregados</i> .....	76

4.1.3	<i>Fabricação</i>	77
4.1.4	<i>Resistência à compressão</i>	79
4.1.5	<i>Absorção de água</i>	81
4.1.6	<i>pH</i>	82
4.1.7	<i>Ensaio de lixiviação/solubilização</i>	83
4.1.8	<i>Fluorescência de raios-x, Difração de raios-x e Microscopia eletrônica de varredura</i>	85
4.1.9	<i>Análise estatística dos resultados</i>	85
4.2	<b>Resultados e Discussão</b>	86
4.2.1	<i>Características dos agregados e do cimento CP V – ARI</i>	86
4.2.2	<i>Lixiviação, Solubilização e pH dos blocos de concreto</i>	93
4.2.3	<i>Eficiência de retenção de contaminantes na estabilização/solidificação</i>	100
4.2.4	<i>Difração de raios-x e Fluorescência de raios-x</i>	104
4.2.5	<i>Resistência à compressão</i>	116
4.2.6	<i>Absorção de água</i>	120
4.2.7	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i>	125
4.3	<b>Conclusões Parciais</b>	129
<b>CAPÍTULO V</b>		<b>131</b>
<b>5 FABRICAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO EM ESCALA INDUSTRIAL</b>		<b>131</b>
5.1	<b>Metodologia</b>	131
5.1.1	<i>Materiais utilizados</i>	131
5.1.2	<i>Traços e fabricação industrial dos blocos</i>	133
5.1.3	<i>Ensaio realizados</i>	135
5.2	<b>Resultados e Discussão</b>	137
5.2.1	<i>Lixiviação/ solubilização</i>	137
5.2.2	<i>Eficiência de retenção de contaminantes na estabilização/solidificação</i>	139
5.2.3	<i>Difração de raios-x e fluorescência de raios-x</i>	140
5.2.4	<i>Resistência à compressão</i>	143
5.2.5	<i>Absorção de água</i>	147
5.2.6	<i>Resistência à abrasão</i>	149
5.3	<b>Conclusões Parciais</b>	150
5.4	<b>Cenários da reutilização de poeira de jateamento e lodo galvânico na indústria de pavimentos intertravados</b>	152
<b>CAPÍTULO VI</b>		<b>154</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b>		<b>154</b>
6.1	<b>Sugestões para trabalho futuros</b>	154
<b>CAPÍTULO VII</b>		<b>156</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		<b>156</b>
<b>APÊNDICE A</b>		<b>170</b>
<b>APÊNDICE B</b>		<b>175</b>
<b>ANEXO A</b>		<b>178</b>
<b>ANEXO B</b>		<b>180</b>
<b>ANEXO C</b>		<b>181</b>

**ANEXO D..... 182**

## CAPÍTULO I

### 1 INTRODUÇÃO

A aceleração do processo produtivo em função do desenvolvimento econômico e social acentuado a partir do século XVIII, culminou na exploração indiscriminada dos recursos naturais na expectativa de atender às necessidades da sociedade que se formava, sem a preocupação com as consequências e danos ambientais inerentes, principalmente, à instalação das indústrias.

A partir desse período a geração de resíduos e sua acumulação no ambiente aumentaram proporcionalmente ao crescimento populacional e, ao passo em que as cidades e seus complexos industriais foram ocupando espaços, surgiram os problemas provenientes da poluição ambiental resultantes das atividades antrópicas. A sociedade, de forma geral, tornou-se mais exigente quanto às suas necessidades e o modelo de desenvolvimento baseou-se no consumo pelo consumo e, só a partir da década de 60, a questão ambiental passou a ser tratada como um problema e os recursos naturais entendidos como finitos.

O desenvolvimento econômico aliado à preservação do ambiente tornou-se pauta das reuniões dos líderes mundiais. A primeira Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento aconteceu em Estocolmo, em 1972, e deu origem ao Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA, destacando, a partir desse período a preocupação com a sustentabilidade do desenvolvimento socioeconômico, primando pela redução do uso de recursos naturais e da redução da geração de resíduos.

As indústrias são as principais geradoras de resíduos, tanto em quantidade, quanto em periculosidade. Seus resíduos, se gerenciados de maneira incorreta, constituem uma das principais causas de danos ambientais e à saúde humana, devido a sua toxicidade e diversidade de composição química.

Com o aumento das pressões no que diz respeito à geração e disposição correta de resíduos, cada vez mais países de todo o mundo estão desenvolvendo legislações específicas e mais restritivas para a prática do gerenciamento de rejeitos. No Brasil, essas pressões culminaram na promulgação da Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, a

qual instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) brasileira, pautada na gestão integrada de resíduos, não geração, redução, reutilização e responsabilidade compartilhada entre o poder público e geradores.

A atividade galvanotécnica industrial é um dos setores mais críticos, no que diz respeito à emissão de poluentes para o ambiente, tanto no aspecto de grandes volumes de descartes como também pelas suas características químicas, as quais são prejudiciais tanto para o ambiente, quanto para os seres humanos, se descartados inadequadamente (BORGO, 2005).

Com o crescimento da exigência de implantação de políticas ambientais nas indústrias desse setor, as empresas estão cada vez mais interessadas em maneiras de minimizar a geração de resíduos, assim como no desenvolvimento de meios viáveis para o reaproveitamento e estabilização dos resíduos, para garantir a disposição final de forma segura da parcela de rejeitos que não pode ser reduzida ou eliminada.

A construção civil é um setor que tem se mostrado promissor na utilização de resíduos industriais por meio da utilização de novos materiais para seu próprio consumo. Diversos estudos já foram e estão sendo realizados com o objetivo de desenvolver técnicas e tecnologias limpas e viáveis para a reutilização de resíduos industriais.

Esse eixo de pesquisa centra-se no estudo da incorporação/reutilização de resíduos industriais na fabricação de artefatos, tais como blocos e tijolos cerâmicos e cimentícios, telhas, lajotas para piso e forro, blocos para piso e tubos cerâmicos, com o intuito de diminuir a demanda de recursos naturais explorados por este setor, juntamente com a necessidade da diminuição do impacto ambiental gerado pela grande quantidade de resíduos a serem dispostos.

Uma das técnicas utilizadas para a incorporação de resíduos para a fabricação de materiais para a construção civil são os processos de estabilização/solidificação, que vêm sendo usados cada vez mais como opção de tratamento para diferentes tipos de resíduos industriais, principalmente para aqueles com alta concentração de metais pesados (CHAUDHARY, 2006).

Estabilização refere-se ao processo que envolve uma reação química que reduz a lixiviação do resíduo perigoso, imobilizando os componentes químicos e diminuindo a solubilidade, tornando-os menos prejudiciais (SHI e SPENCE, 2004; EPA, 2009, FRANCO, 2011). Solidificação refere-se a um processo que vincula o meio

contaminado com um reagente/aglomerante, alterando suas propriedades físicas e aumentando as propriedades mecânicas, como a resistência à compressão, diminuindo a sua permeabilidade e encapsulando os contaminantes para formar um material sólido (SHI e SPENCE, 2004; EPA, 2009; FRANCO, 2011).

Esses dois tipos de processo vêm sendo utilizados principalmente no aproveitamento de rejeitos, incorporando-os na fabricação de diversos tipos de materiais, para a posterior utilização no ramo da construção civil, promovendo redução de custos por meio da diminuição da utilização de matérias-primas *in natura*.

Diante disso, a aplicação de tecnologias apropriadas e ecológicas, no desenvolvimento de novos produtos para a construção civil, utilizando resíduos, provenientes da indústria de galvanoplastia, se mostra uma alternativa interessante para a minimização e disposição adequada desses rejeitos no ambiente, levando também à diminuição do impacto ambiental negativo causado pela disposição dos mesmos.

## **1.1 Justificativa**

A escolha pela utilização de resíduos sólidos da indústria galvânica na fabricação de blocos de concreto para pavimentação se deu por uma necessidade tecnológica e principalmente por sua importância ambiental. Tanto a poeira de jateamento quanto o lodo galvânico são resíduos sólidos gerados em grandes quantidades (milhões de toneladas) todos os anos pelo setor metal/mecânico, possuem alta concentração de substâncias tóxicas em sua composição, principalmente metais pesados, além de não se ter formas de reutilização disponíveis para esses resíduos, sendo sua principal forma de destinação final os aterros industriais, onde ocupam grandes volumes.

A importância ambiental se traduz na necessidade de redução dos impactos negativos causados pela disposição inadequada dos resíduos, bem como da minimização do consumo de recursos naturais de agregados utilizados na indústria da construção civil, por meio da técnica de estabilização/solidificação de contaminantes em matrizes de cimento, ao mesmo tempo com a possibilidade de reaproveitamento dos mesmos como matérias-primas alternativas na fabricação de artefatos de concreto.

O aspecto tecnológico está atrelado à utilização dos resíduos no desenvolvimento de um produto alternativo que possa atender às exigências de qualidade frente aos produtos disponíveis no mercado e que esteja disponível como uma alternativa de utilização para a pavimentação.

De acordo com as considerações apresentadas, o uso de resíduos galvânicos na fabricação de blocos de concreto para pavimentos, pode apresentar algumas vantagens, tais como:

- Tratamento dos resíduos por meio da estabilização/solidificação em cimento, diminuindo sua periculosidade e os tornando inertes;
- Minimização da possibilidade de disposição inadequada desses resíduos que podem causar problemas de saúde pública e ambiental;
- Redução do grande volume de resíduos disposto nos aterros industriais;
- Redução da extração e do consumo das fontes naturais de agregados utilizados na produção do concreto;
- Desenvolvimento de um produto alternativo, ambientalmente correto e com menor custo.

Tendo em vista as vantagens citadas, a proposta desta tese pode contribuir para que a poeira de jateamento e o lodo galvânico deixem de serem considerados problemas ambientais, para serem considerados resíduos industriais passíveis de utilização como matérias-primas para a fabricação de materiais alternativos empregados na construção civil.

## **1.2 Hipótese**

### **1.2.1 Hipótese Principal**

“Utilização de resíduos sólidos da indústria galvânica na fabricação de blocos de concreto para pavimentação, com o intuito de substituir parcialmente os agregados miúdos utilizados na fabricação do concreto e ao mesmo tempo, promover a imobilização dos contaminantes do resíduo na matriz de cimento.”

### 1.2.2 Hipóteses Secundárias

Para a comprovação da hipótese principal, foram formuladas as hipóteses secundárias, selecionando-se aquelas mais relevantes e viáveis dentro do prazo da pesquisa e dos recursos disponíveis. A partir disso, foram formuladas as seguintes hipóteses:

- “A poeira de jateamento e o lodo galvânico apresentam características necessárias para sua utilização como substituição parcial do agregado miúdo na fabricação de blocos de concreto para pavimentação”.
- “Os blocos fabricados com incorporação de resíduos sólidos galvânicos possuem características técnicas necessárias para serem utilizados como alternativa para pavimentação, podendo ser aplicados em ambientes com solicitações leves de carga.”
- “A substituição parcial de agregado natural por resíduos galvânicos pode melhorar as características de resistência à compressão, absorção de água e abrasão dos blocos de concreto quando comparados com blocos fabricados sem a utilização dos mesmos.”
- “A incorporação dos resíduos galvânicos na massa de concreto dos pavers não afeta significativamente as características de lixiviação/solubilidade do produto final, pois os contaminantes presentes no resíduo são imobilizados na matriz de cimento.”
- “Existe interação entre os resíduos e a matriz de cimento, com a formação de compostos que contribuem para a imobilização dos contaminantes no concreto.”

### 1.3 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o estudo do tratamento/reaproveitamento de resíduos sólidos provenientes da indústria galvanotécnica na fabricação de blocos de concreto para a pavimentação, utilizando-se a técnica de estabilização/solidificação.

#### 1.3.1 Objetivos Específicos

Entre outros aspectos de interesse, pode-se destacar como objetivos específicos:

- Estudar a incorporação de dois resíduos galvânicos em blocos de concreto para pavimentação como substituição parcial do agregado miúdo natural: poeira de jateamento, proveniente das câmaras de jateamento de peças e o lodo de galvanoplastia, proveniente da estação de tratamento de efluentes das indústrias galvânicas;
- Produzir blocos de concreto com diferentes proporções de resíduo em substituição aos agregados miúdos naturais;
- Determinar a porcentagem ideal de substituição de agregados miúdos pelos resíduos e testar a fabricação dos blocos em escala industrial;
- Verificar a influência da incorporação dos resíduos nas propriedades de resistência à compressão, absorção de água, resistência à abrasão e microestrutura dos blocos de concreto fabricados;
- Determinar a eficiência de retenção/fixação dos contaminantes presentes nos resíduos por meio da técnica de estabilização/solidificação em cimento;
- Avaliar quais interações ocorrem entre os resíduos e o aglomerante;

## CAPÍTULO II

### 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 Problemática dos resíduos sólidos industriais

As atividades antrópicas, inevitavelmente, são geradoras de diversos tipos de resíduos que podem poluir água, ar e solo por emissões, deposição, disposição, descarga, infiltração, carreamento, acumulação, percolação e injeção de substâncias ou produtos poluentes em estado sólido, líquido ou gasoso.

Os resíduos sólidos são definidos, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10004 (2004), como sendo:

“Todo resíduo nos estados sólido e semissólido que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.”

Os resíduos sólidos podem ser classificados quanto à sua origem e periculosidade. A classificação é de fundamental importância para o estabelecimento de normas, leis, padrões, tratamentos e gestão, desde a fonte geradora à disposição final desses resíduos.

Quanto à origem podem ser classificados como domiciliar, comercial, público, serviços de saúde, portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários, industrial, radioativo, espacial, agrícola e de construção e demolição.

De acordo com a ABNT NBR 10004 (2004), os resíduos sólidos são classificados segundo a sua periculosidade, conforme demonstrado na Figura II.1:

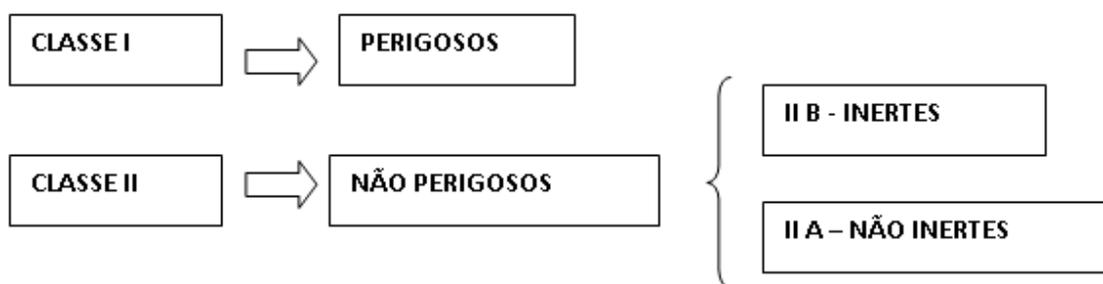


Figura II.1 – Classificação dos resíduos sólidos quanto a sua periculosidade (Fonte: ABNT NBR 10004, 2004)

Resíduos Classe I – Perigosos, apresentam risco à saúde pública ou ao ambiente, caracterizando-se por terem uma ou mais das seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Resíduos Classe II - Não Perigosos, são subdivididos em:

- II A - Não Inertes - Podem ter propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, porém não se enquadram como resíduo Classe I ou II B.
- II B - Inertes - Não têm nenhum dos seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de águas.

A classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e ainda, a comparação desses constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao ambiente é conhecido. Essas listagens são apresentadas nos anexos A a G da norma ABNT NBR 10004 (2004).

Segundo Kraemer (2005), dentre todos os tipos de resíduos sólidos, os resíduos sólidos industriais são um dos maiores responsáveis pelas agressões fatais ao ambiente. Eles são distintos dos demais tipos de resíduos, pois, exigem condições especiais de acondicionamento, coleta, transporte, tratamento e disposição final, devido às suas características e composições variadas.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 313 (2002):

“Resíduo sólido industrial é todo o resíduo que resulte de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semissólido, gasoso - quando contido, e líquido - cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d’água, ou exijam para isso

soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição.”

Segundo Tocchetto (2010), as atividades industriais geram diferentes tipos de resíduos, com características as mais diversas. São originados das atividades dos diferentes ramos industriais, tais como metalúrgico, químico, petroquímico, celulose e papel, alimentício, mineração, etc.

Assim, os resíduos industriais são bastante variados, podendo ser representados por resíduos de processos, resíduos de operações de controle de poluição ou descontaminação, materiais adulterados, materiais e substâncias resultantes de atividades de remediação de solo contaminado, resíduos da purificação de matérias-primas e produtos, cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, borracha, metal, escórias, vidros e cerâmicas.

Entre os resíduos industriais inclui-se grande quantidade de material perigoso (em torno de 40%), que necessita de tratamento especial devido ao seu alto potencial de impacto ambiental e à saúde.

Os resíduos industriais podem ser considerados como o resultado da ineficiência do processo produtivo, pois são, em última análise, matérias-primas mal aproveitadas. Em função das suas características físico-químicas e biológicas, os resíduos industriais podem trazer impactos adversos ao ambiente e à saúde humana como frisado anteriormente, e por esta razão uma adequada gestão desses resíduos se faz imperativa.

Em lugares com grande concentração industrial, é comum encontrar ambientes extremamente poluídos. Além da fumaça, da fuligem e do pó, pode ocorrer também a geração de efluentes líquidos e um grande volume de rejeitos, que na maioria das vezes contém resíduos perigosos que podem apresentar em sua composição, produtos químicos (cianetos, pesticidas, solventes, etc), metais (mercúrio, cádmio, chumbo, etc) e solventes químicos, prejudiciais à saúde do homem e do ambiente onde são descartados (KRAEMER, 2005; MEYER *et al.*, 2010).

Os resíduos sólidos oriundos das atividades industriais, normalmente, não retornam aos processos produtivos como forma de recuperar matéria e energia, mas sim são descartados no ambiente de maneira desordenada interferindo nos sistemas naturais (MISSIAGGIA, 2002).

Resíduos descartados em lugares inadequados, como em terrenos baldios, recursos hídricos ou enterrados em áreas impróprias sem os cuidados necessários, podem desencadear a contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas, expondo os moradores da redondeza a enfermidades diversas. Além das indústrias químicas que descartam resíduos e embalagens de substâncias tóxicas, existem indústrias como frigoríficos e outras produtoras de gêneros alimentícios, que normalmente geram resíduos orgânicos, causando outras formas de poluição ambiental (MEYER *et al.*, 2010).

Nascimento e Mothé (2007) citam que as indústrias tradicionalmente responsáveis pela maior geração de resíduos perigosos são as metalúrgicas, as indústrias de equipamentos eletroeletrônicos, as fundições, a indústria química, a indústria de couro e borracha, dentre outras.

O crescimento da população, seu desenvolvimento e industrialização são motivo de preocupação das autoridades e órgãos ambientais de países de todo o mundo, devido ao aumento da geração de resíduos provenientes de processos produtivos, principalmente nas regiões de alta concentração industrial e pela inexistência de locais adequados para recepção, tratamento e disposição final dos resíduos (PEREIRA, 2008).

No Brasil, o último diploma legal regulador das atividades industriais é a Lei nº 12.305 (2010), denominada Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Até sua publicação a legislação ambiental brasileira tratava a questão dos resíduos genericamente, implícitos em outras normativas legais, como conceitos de poluição. Com a PNRS a questão dos resíduos sólidos passou a vigorar explicitamente na cultura das organizações brasileiras, alterando o paradigma tradicional da concepção industrial do estado brasileiro.

De acordo com a PNRS, a destinação dos resíduos industriais, é obrigação do gerador. Como o gerador é o responsável pelo tratamento e destinação final dos resíduos, ele pode executar esse papel por si próprio ou contratar serviços de empresas especializadas.

Segundo Paixão (2011) há uma dificuldade para o alcance dos objetivos instituídos pelo poder público, por meio do instrumento legal que representa os interesses da sociedade. O autor chama a atenção que nesta relação o contratante ou executor do serviço de tratamento e destinação adequada dos resíduos é o próprio gerador, mas o usuário desse serviço, que sentirá as consequências de um tratamento

ineficiente ou da disposição inadequada de resíduos, é a sociedade. Portanto, a questão do tratamento e destinação dos resíduos sólidos industriais envolve interesses privados e públicos, uma vez que o investimento e a responsabilidade legal são privados e o risco ambiental é público, de toda a sociedade.

### 2.1.1 Panorama Brasileiro

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos, publicado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE 2007), no mundo são gerados aproximadamente 1,8 bilhões toneladas/ano de resíduos sólidos industriais (não perigosos e perigosos), sendo os Estados Unidos, África do Sul, China, Índia, e alguns países da Europa Ocidental, os maiores geradores desse tipo de resíduo. No Brasil são gerados aproximadamente 98 milhões de toneladas/ano de resíduos sólidos industriais, sendo 3,9 % desse total classificados como perigosos.

A Tabela II.1 apresenta uma estimativa parcial da geração de resíduos industriais no Brasil, detalhada por estado. Os dados da Tabela II.1 estão disponíveis no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2011) e foram compostos pelos Inventários Estaduais e Panoramas de estimativas de geração de resíduos sólidos industriais, abrangendo um total de 13 estados.

Tabela II.1- Geração de resíduos industriais no Brasil (Parcial)

<i>UF</i>	<i>Perigosos (t/ano)</i>	<i>Não perigosos (t/ano)</i>	<i>Total (t/ano)</i>
<i>Acre</i> *	5.500	112.765	118.265
<i>Amapá</i> *	14.341	73.211	87.552
<i>Ceará</i> *	115.238	393.831	509.069
<i>Goiás</i> *	1.044.947	12.657.326	13.702.273
<i>Mato Grosso</i> *	46.298	3.448.856	3.495.154
<i>Minas Gerais</i> *	828.183	14.337.011	15.165.194
<i>Paraíba</i> *	657	6.128.750	6.129.407
<i>Paraná</i> **	634.543	15.106.393	15.740.936
<i>Pernambuco</i> *	81.583	7.267.930	7.349.513
<i>Rio de Janeiro</i> **	293.953	5.768.562	6.062.515
<i>Rio Grande do Norte</i> *	3.363	1.543.450	1.546.813
<i>Rio Grande do Sul</i> *	182.170	946.900	1.129.070
<i>São Paulo</i> **	535.615	26.084.062	26.619.677
<b>TOTAL</b>	<b>3.786.291</b>	<b>93.849.047</b>	<b>97.655.438</b>

Fonte: BRASIL (2011) – Plano Nacional de Resíduos Sólidos – versão preliminar para consulta pública.

\*Inventários Estaduais dos Resíduos Sólidos Industriais

\*\* Panorama das estimativas de geração dos resíduos sólidos industriais no Brasil – ABRELPE (2007)

Observa-se que os estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais e Goiás são os principais geradores de resíduos sólidos industriais do país, totalizando juntos cerca de 72,9% de todo o resíduo gerado no Brasil.

Devido a grande variedade e quantidade de indústrias no país, os inventários parciais dos estados nem sempre foram elaborados com a mesma tecnologia, períodos e classificações. A análise dos inventários estaduais demonstra uma deficiência no levantamento real dos dados com resultados discrepantes necessitando de uma padronização, revisão e atualização das informações (MELCHERT, 2012).

Um dos grandes problemas que a sociedade tem enfrentado é garantir uma correta disposição do resíduo depois de gerado, em especial dos resíduos perigosos que levam a situações críticas de degradação ambiental. Apesar dos enormes avanços em relação ao controle da degradação ambiental, ainda ocorrem vários desastres ambientais por inadequadas práticas de disposição de resíduos sólidos. A Tabela II.2 lista alguns impactos ocorridos no Brasil em função dos tipos de irregularidades no armazenamento, transporte e/ou disposição desses resíduos.

Outro estudo realizado pela ABRELPE em 2008, intitulado “Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2008”, fez um levantamento em empresas privadas que realizam o tratamento de resíduos sólidos industriais provenientes de diversos estados do país. O estudo teve como objetivo traçar um perfil da situação do tratamento dos resíduos no Brasil no ano de 2008, além de analisar a evolução do tratamento em um período de 4 anos, de 2004 a 2007. Os dados obtidos no estudo foram adaptados e estão disponíveis na Tabela II.3.

Tabela II.2 – Descarte irregular de resíduos perigosos e seus impactos

<i>Ano e local da ocorrência</i>	<i>Impacto ambiental</i>	<i>Principais efeitos</i>	<i>Compartimento ambiental afetado</i>
2008* Rio de Janeiro	Vazamento do pesticida endosulfan durante o descarregamento	Contaminação do rio Paraíba do Sul	Águas superficiais e fauna aquática
2007* Santos - SP	Escória contendo altos teores de metais pesados, dispostas de forma irregular	Contaminação do mangue	Solo, águas subterrâneas e mangue
2007* São Paulo	Resíduos de galvanoplastia dispostos inadequadamente	Contaminação de águas superficiais e subterrâneas, solo	Águas superficiais e subterrâneas, solo
2006** Minas Gerais	Vazamento de 400 milhões de m <sup>3</sup> de resíduos do tratamento de bauxita	Contaminação do Rio Muriare	Ecossistemas, fauna aquática e inundação
2003* Mogi das Cruzes - SP	Altas concentrações de metais pesados em solo e água superficial	Comprometimento do solo de uso agrícola	Solo e águas superficiais
2003** Minas Gerais	Vazamento de resíduos da indústria de papel	Contaminação do rio Pombal, inclusive o rio Paraíba do Sul	Ecossistemas e possibilidade de contaminação do solo e água subterrânea

Fonte: \* Moura (2008) e \*\* Ambiente Brasil (2011).

Tabela II.3 - Resíduos industriais tratados no Brasil

<i>Classe</i>	<i>Resíduos Industriais Tratados</i>							
	<i>2004</i>		<i>2005</i>		<i>2006</i>		<i>2007</i>	
	<i>t/ano</i>	<i>%</i>	<i>t/ano</i>	<i>%</i>	<i>t/ano</i>	<i>%</i>	<i>t/ano</i>	<i>%</i>
<i>Perigoso</i>	648.959	22	985.261	31	1.009.95	23	1.545.36	26
<i>Não Perigoso</i>	2.297.842	78	2.216.459	69	3.447.74	77	4.406.14	74
<b><i>TOTAL</i></b>	<b>2.946.801</b>	<b>100</b>	<b>3.201.719</b>	<b>100</b>	<b>4.457.69</b>	<b>100</b>	<b>5.951.50</b>	<b>100</b>

Fonte: ABRELPE, 2008 (adaptado)

Como pode ser observado nas Tabelas II.1 e II.3 dos 97,6 milhões de toneladas de resíduos industriais gerados, foram contabilizados pelas empresas privadas o tratamento de apenas 5,95 milhões de toneladas no ano de 2007, ou seja, 6,1% foram tratados e destinados de maneira adequada. Sobre o restante nada se pode afirmar, se foram tratados por seus geradores em unidades localizadas, se foram reciclados ou

ainda, se foram dispostos de forma irregular no ambiente, contribuindo assim para a contaminação do solo, da água e do ar.

Porém, verifica-se que houve um crescimento na quantidade de resíduos tratados no período analisado, isto pode ter ocorrido por dois motivos: um o crescimento do parque industrial, e a também pela cobrança das autoridades competentes quanto à correta disposição de resíduos.

Na Tabela II.4 estão discriminadas as tecnologias utilizadas nos últimos anos no Brasil, para a destinação dos resíduos sólidos industriais.

Tabela II.4- Quantidades de RSI tratados e tecnologias utilizadas no Brasil

<i>Tecnologias</i>	<i>2004*</i> <i>(t/ano)</i>	<i>2005*</i> <i>(t/ano)</i>	<i>2006*</i> <i>(t/ano)</i>	<i>2007*</i> <i>(t/ano)</i>
<i>Aterro Classe IIA</i>	1.773.088	1.605.381	2.985.521	3.655.372
<i>Aterro Classe IIB</i>	488.595	505.793	342.617	579.247
<i>Aterro Classe I</i>	119.644	235.466	170.776	251.646
<i>Co-processamento em Forno de Cimento</i>	492.00	690.00	790.000	981.000
<i>Incineração</i>	48.219	63.630	64.286	71.625
<i>Outras tecnologias</i>	65.257	101.449	104.492	402.969
<i>Total</i>	2.946.801	3.201.719	4.457.692	5.951.499

Fonte: ABRELPE, 2008 - \* Panorama dos resíduos sólidos no Brasil em 2008 (Pesquisa realizada em 2007 com amostragem de 87% do mercado de tratamento de resíduos). ABRELPE (2004, 2005, 2006).

Como pode ser observado na Tabela II.4 dos 5,95 milhões de toneladas de resíduos industriais destinados no Brasil, cerca de 75% tem como destinação final aterros industriais, os outros 25% estão distribuídos entre co-processamento, tratamentos térmicos e biológicos. Esses dados mostram que o Brasil, além de apresentar uma grande geração de resíduos industriais, a maioria de seus resíduos tem como tratamento e disposição final a destinação a aterros, apresentando uma porcentagem irrisória de reaproveitamento, reutilização e reciclagem.

De acordo com Melchert (2012) e Gunther (2008), na Europa existe uma grande preocupação com a recuperação e reaproveitamento energético dos resíduos sólidos. Na Alemanha somente em 2003, foram gerados 47 milhões de toneladas de resíduos sólidos industriais e 42% desse total foram recuperados.

Cada vez mais, o gerenciamento de resíduos sólidos, a minimização de sua geração e a maximização do seu reaproveitamento, tem sido um fator de responsabilidade das empresas, e um fator competitividade do mercado, que exige ações concretas no que se refere ao cuidado e preservação do ambiente.

A PNRS brasileira tem como premissa a ecologia industrial, com enfoque no gerenciamento de resíduos e principalmente na redução, reciclagem, reuso e remanufatura dos mesmos. Esta abordagem é inovadora, pois abre portas para o desenvolvimento de tecnologias para aproveitamento dos resíduos antes de se pensar em destinação final.

Pereira *et al.* (2008) citam que no Brasil, apesar do gerenciamento adequado ser composto de grandes desafios, a reutilização de resíduos pode ser considerada como alternativa em muitos casos, para fins tais como pavimentação de estradas, incorporação na construção civil, incorporação ao solo etc. Em todos os casos, tanto para a reutilização, tratamento, quanto para a disposição final, leva-se em consideração os elementos potencialmente contaminantes, que podem ser introduzidos no meio circundante.

Segundo o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL, 2011), o tratamento adequado dos resíduos é um dos pilares de atuação do desenvolvimento sustentável e sua urgente implantação é primordial para toda a comunidade, nomeadamente, para quem os gera e para quem sofre os impactos ambientais negativos do seu não tratamento.

Todos os países, não importando sua localização ou seu “status” internacional, geram milhões de toneladas de resíduos por dia de resíduos, o que justifica a necessidade da criação de mecanismos que promovam a conscientização, o desenvolvimento e a implantação de novas tecnologias para amenizar e evitar a evolução desse quadro. A aplicação de tecnologias sustentáveis e eficazes que visem à redução da utilização de recursos naturais, do desperdício, da geração de resíduos e da poluição, constitui uma ação de prioridade mundial e um desafio inerente às estratégias de produção mais limpa, cujo objetivo principal é evitar a geração de resíduos e emissões, a partir de um enfoque preventivo (NASCIMENTO e MONTHÉ, 2007).

## **2.2 Galvanoplastia**

### **2.2.1 Processo de galvanoplastia**

A galvanoplastia é um ramo da indústria metal-mecânica no qual é realizado o tratamento de superfícies metálicas ou não (tais como plástico), por meio de deposição de uma fina camada de metais ou ligas, mediante processos químicos e eletrolíticos, conferindo um revestimento denso, uniforme e aderente na superfície desejada.

O revestimento produzido é normalmente para fins decorativos, de proteção contra a corrosão, aumento da durabilidade e melhora de propriedades superficiais e características de resistência, espessura, condutividade, lubrificação e capacidade de estampar (LOU e HUANG, 2006; SESI, 2007).

A galvanoplastia é amplamente utilizada em diversos ramos da indústria, tais como naval, automotiva, aeroespacial, eletrônica, jóias e bijuterias, informática, construção civil, telefonia, indústrias de brinquedos entre outros. O elemento principal do processo galvanotécnico é célula/cuba eletrolítica (unidade de galvanoplastia). Na célula eletrolítica uma corrente elétrica passa através de um banho contendo um eletrólito, no qual estão imersos um ânodo, e um cátodo onde ocorrerão as reações de oxidação e redução que irá culminar na deposição de metais na superfície desejada (LOU e HUANG, 2006; SESI, 2007).

O processo de galvanoplastia compõe-se de diversas etapas que vão desde a preparação das peças até seu pós-tratamento. As três principais etapas desse processo são: pré-tratamento, tratamento e pós-tratamento.

O pré-tratamento consiste na preparação da superfície a ser tratada, por meio mecânico ou químico, para que o revestimento tenha boa aderência, uniformidade e aparência. Nesta etapa são removidos óxidos metálicos, camadas de sujeira ou matéria orgânica que eventualmente estejam presentes, com a finalidade de melhorar o contato do revestimento com a superfície da peça, reduzir a rugosidade, ou ainda proteger a peça. Nas etapas de preparação utiliza-se uma sequência de operações, como lixagem, polimento, desengorduramento, decapagem e proteções temporárias (OLIVEIRA, 2007; SESI, 2007).

- *Pré-tratamento mecânico* – escovação, lixamento, polimento e jateamento, utilizando escovas de aço ou latão, rolos de esmeril ou de lixas, e outros materiais abrasivos, para a remoção de rebarbas, sulcos, irregularidades, camadas de óxidos e resíduos de tintas e de solda;
- *Pré-tratamento químico*: consiste nos processos de desengraxe e decapagem. O desengraxe tem como objetivo a remoção de substâncias gordurosas e graxas presentes na superfície metálica. Esse processo pode ser realizado por meio de métodos químicos ou eletrolíticos utilizando-se solventes orgânicos (como tricloroetileno e percloroetileno) na fase líquida ou vapor, ou soluções aquosas de sais alcalinos (carbonato de sódio, hidróxido de sódio) e produtos umectantes ou aditivos, tais como, fosfato, silicato, detergentes sintéticos, cianeto e complexantes tipo EDTA, glutamato e citrato de sódio. A decapagem é a remoção dos óxidos, hidróxidos e outras impurezas sólidas que se formam na superfície da peça. Pode ser realizada por meio da imersão da peça em uma solução ácida, geralmente ácido sulfúrico, clorídrico ou fluorídrico (LOU e HUANG, 2006; OLIVEIRA 2007; SESI, 2007; TOCCHETO, 2004).

No tratamento químico, as peças são colocadas na célula eletrolítica imersas em eletrólitos, onde são ligadas ao polo negativo de uma fonte de corrente contínua, tornando-se cátodo, no qual ocorre a deposição metálica. O tratamento pode se desenvolver numa sequência de banhos. Por exemplo, para a cromação, a peça é inicialmente cobreada, a seguir niquelada e, ao final, recebe uma camada de cromo. O alumínio e suas ligas são submetidos ao processo de oxidação forçada, anodização, em que este metal é oxidado, formando uma camada protetora, isolante e com alta dureza (SESI, 2007). A Figura II.2 apresenta o equipamento de galvanoplastia utilizado para o recobrimento de bijuterias e a imersão das peças no banho.

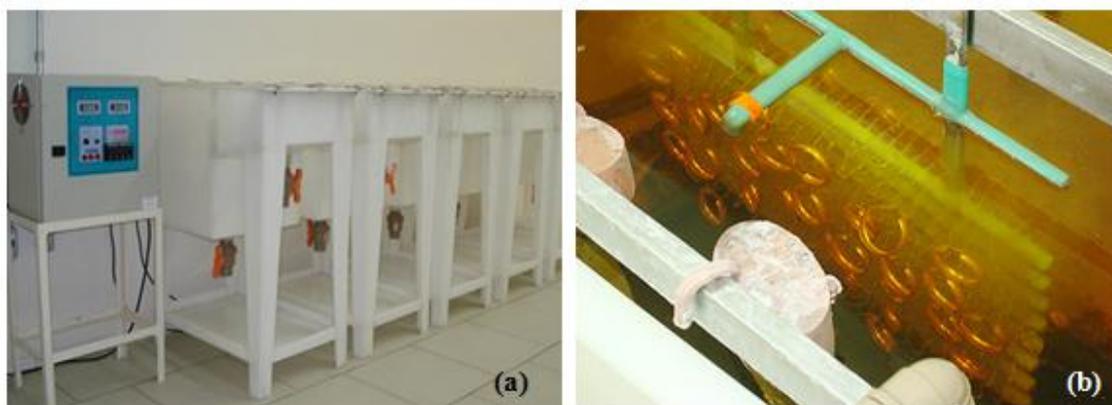


Figura II.2 – Processo de galvanoplastia em bijuterias: (a) cubas eletrolíticas utilizadas e (b) imersão das peças no banho de eletrólito (Fonte: INFOJÓIAS, 2012).

Dependendo do objetivo do recobrimento das peças, vários tipos de revestimentos podem ser utilizados no processo galvanotécnico (LOU e HUANG, 2006):

- Revestimentos de sacrifício: utilizados para a proteção do metal de base (normalmente ferro e aço). Utilizam-se os metais zinco e cádmio;
- Revestimentos decorativos: utilizados principalmente para tornar a aparência das peças mais atraentes. Metais dessa categoria incluem o cobre, níquel, cromo, zinco e estanho;
- Revestimentos de engenharia: também chamados de revestimentos funcionais, são utilizados para melhorar propriedades específicas da superfície da peça, tais como, soldabilidade, resistência ao desgaste e condutividade. Para essa finalidade são utilizados os metais ouro, prata, platina, estanho, chumbo, paládio, ródio, ósmio entre outros;

Diferentes metais de revestimentos podem precisar de diferentes tipos de eletrólitos. A composição e as propriedades do eletrólito são muito importantes para a qualidade do revestimento. Os eletrólitos podem incluir soluções aquosas de ácidos, bases, ou sais de metais, certos líquidos puros, e sais fundidos. Gases também podem atuar como eletrólitos sob condições de alta temperatura ou baixa pressão. Além de sais de metais, eletrólitos de eletrodeposição geralmente contêm aditivos para várias finalidades. Alguns agentes são usados para aumentar a condutividade do eletrólito, outros podem ser utilizados para estabilizar o banho, ativar a superfície da peça (agentes tensoativos ou agentes umectantes), ou otimizar as propriedades físico-químicas do revestimento (LOU e HUANG, 2006).

Entre as várias etapas do processo de tratamento químico de galvanoplastia, há os processos de lavagem das peças que tem como objetivo minimizar a contaminação entre as diversas etapas do processo, assegurando que as peças estejam em condições de serem recobertas com a qualidade exigida para o produto final (TOCCHETO, 2004).

As soluções residuais devem ser removidas com a utilização de água, antes que as peças sigam para a próxima etapa. O efluente proveniente da lavagem das peças deve ser enviado para a estação de tratamento de efluentes da indústria para ser tratado antes de ser descarregado na rede pública de esgoto.

A última fase do processo de galvanoplastia pode ser definida como um pós-tratamento, em que as peças passam por processos de lavagem, com água fria ou quente, secagem em centrífuga, estufa ou jatos de ar; banho de óleo para embalagem e proteção; e pintura ou envernizamento, para encaminhamento para embalagem, estoque e expedição (SESI, 2007).

A Figura II.3 mostra resumidamente o fluxograma de processo de uma típica planta de galvanoplastia.

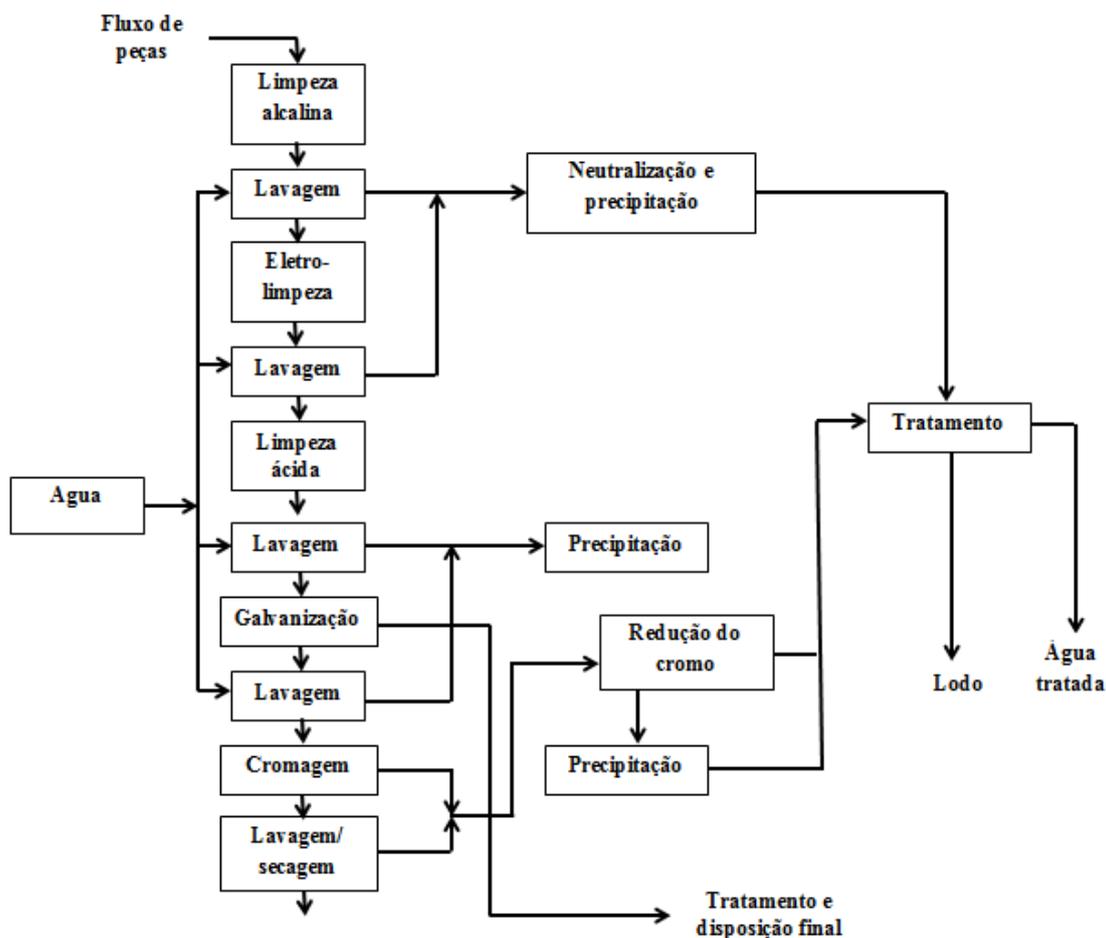


Figura II.3 – Fluxograma de um processo de uma planta galvanoplastia (adaptada de LOU e HUANG, 2006).

### 2.3 Resíduos da indústria galvanotécnica

De uma forma abrangente os principais poluentes gerados no processo de galvanoplastia podem ser divididos em efluentes líquidos, emissões gasosas e resíduos sólidos. A Figura II.4 apresenta um fluxograma do processo de galvanoplastia, com destaque para os pontos de geração de poluentes.

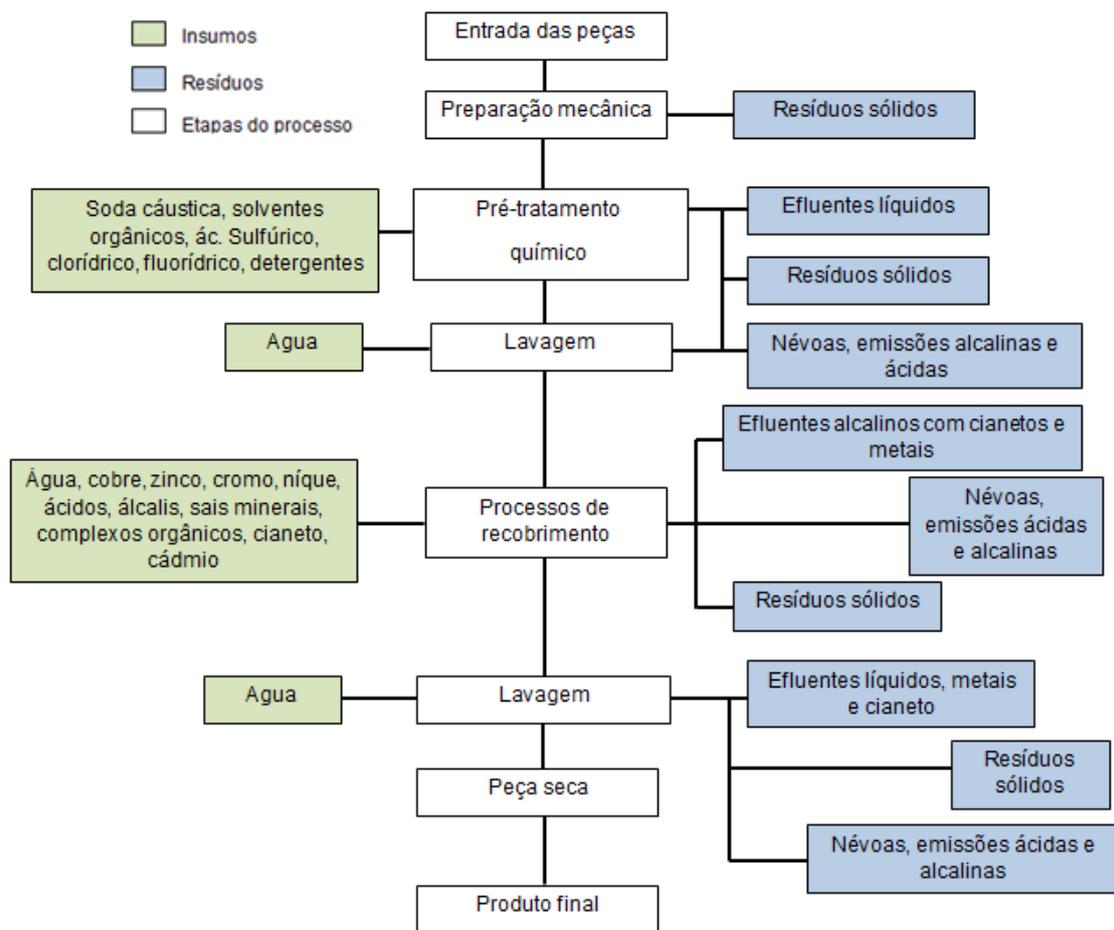


Figura II.4 – Pontos de geração de poluentes no processo de galvanoplastia (adaptado INTEC, 2001 *apud* TELOEKEN, 2011).

Os efluentes líquidos do processo de galvanoplastia são provenientes principalmente dos diversos banhos concentrados exauridos (desengraxantes, decapantes, fosfatizantes, cromatizantes, banhos de eletrodeposição, etc.), das águas de lavagem das peças (menos contaminadas), de restos de produtos auxiliares (abrilhantadores, passivadores, etc.), óleos solúveis (ou não), utilizados para o corte ou revestimento de peças.

Os banhos de revestimento apresentam elevadas concentrações de metais, que contaminam as águas de lavagem, gerando grandes volumes de efluentes líquidos a serem tratados. Os efluentes líquidos geralmente são coloridos, alguns com temperatura superior à ambiente, emitem vapores, e seus pH's geralmente atingem valores extremos, ácido ou alcalino (TOCCHETO, 2004).

As emissões gasosas são geradas devido à evaporação dos líquidos nos banhos quentes e em solventes, e nas reações eletrolíticas nos processos de decapagem, de

desengraxe, de corrosão e nos eletrodos do processo galvânico (OLIVEIRA e CUNHA, 2007). As emissões gasosas podem ser coloridas ou incolores, e são geralmente irritantes para as mucosas. De forma geral essas emissões devem ser controladas por meio da utilização de exaustores e lavadores de gases acoplados aos equipamentos.

Os resíduos sólidos gerados nos processos de galvanoplastia são constituídos em grande parte, de poeiras e compostos particulados metálicos, cerâmicos ou orgânicos provenientes das operações de pré-tratamento mecânico e acabamento das peças, dos lodos dos processos de enxague e também pelos lodos provenientes dos sistemas de tratamento de águas residuais (OLIVEIRA e CUNHA, 2007; TELOEKEN, 2011; TOCCHETO, 2004).

As características desses resíduos são variadas: os lodos geralmente são coloridos (azul, verde, laranja tijolo, branco leitoso, marrom acinzentado), seu pH atinge valores extremos quando não tratado. Os finos provenientes dos pré-tratamentos mecânicos, podem estar contaminados com metais, óxido de alumínio, cerâmicas e microesferas de vidro (BRAILE, 1993).

De acordo com Braile (1993) e Bernardes *et al.*, (2000), existem outras origens para os resíduos sólidos: sucata de metais ferrosos e não-ferrosos, cavacos, precipitação de sólidos em tanques de processo, embalagens de produtos químicos, filtros usados, restos de ânodos e materiais diversos. No entanto o maior volume de resíduos sólidos está associado à geração de lodo galvânico no processo de tratamento de efluentes líquidos.

Os rejeitos do processo galvanotécnico são considerados uns dos mais tóxicos entre os mais diversos tipos de rejeitos industriais, devido à presença de metais pesados, que tem efeito cumulativo, podendo causar diversos efeitos maléficos aos organismos expostos aos mesmos.

Metais e reativos químicos são a base dos processos de tratamento de superfície. A utilização destes componentes é responsável pela geração de resíduos químicos e efluentes, que irão afetar de forma drástica o ambiente, bem como causar sérios problemas de saúde na população. Alguns efeitos podem ser observados rapidamente, outros levam alguns anos até se manifestarem em sua forma mais agressiva.

A seguir serão abordadas as características dos resíduos sólidos de interesse neste trabalho, lodo galvânico e poeira de jateamento, os quais serão incorporados à matéria-prima de fabricação de blocos de concreto para pavimentação.

### 2.3.1 Poeira de jateamento

A poeira de jateamento é um dos resíduos sólidos gerado na etapa de pré-tratamento mecânico das peças que irão passar pelo processo de galvanização. Numa das etapas do pré-tratamento mecânico, ocorre o jateamento das peças com microesferas de vidro, um abrasivo que proporciona a retirada de sujidades, asperezas e irregularidades presentes na superfície das peças. Nas chamadas “câmaras de jateamento”, um equipamento lança, em alta velocidade, microesferas de vidro contra as peças metálicas provocando a ação de limpeza das mesmas por meio do impacto, retirando todos os contaminantes aderidos à superfície. A Figura II.5 apresenta o aspecto das microesferas de vidro e o processo de jateamento.



Figura II.5 – (a) Microesferas de vidro e (b) processo de jateamento de peças (Fonte: ATLASINOX e MICROESFERA, 2012)

Durante o processo de limpeza mecânica, as microesferas se rompem, gerando uma poeira que é constituída basicamente por pó de vidro, metais e sujidades provenientes da peça. Essa poeira é recolhida, acondicionada e levada para aterros industriais, pois não possui mais nenhuma utilidade para as indústrias galvânicas.

De acordo com Borgo (2005), as esferas pós-uso são classificadas como resíduo sólido Classe II B – Não Perigoso/ Inerte (ABNT NBR 10004, 2004), entretanto, essa classificação pode variar de acordo com a composição das peças a serem jateadas. Além disso, a poeira de jateamento é um material não biodegradável, denso e que pode ocupar muito espaço nos aterros industriais e/ou sanitários aonde deve ser disposta.

As microesferas de vidro são compostas por mais de 70% de SiO<sub>2</sub>, são transparentes e sem impurezas visíveis, possuem uma densidade que varia de 2,4 a 2,6 g cm<sup>-3</sup> e uma esfericidade maior ou igual a 75% (SAFEPIGMENT, 2012).

Mesmo com o arraste de metais e sujeiras das peças, a composição da poeira de jateamento praticamente permanece a mesma das microesferas de vidro (BORGIO, 2005), no entanto, como afirmado anteriormente, essa composição dependerá fundamentalmente das características das peças que estão sendo tratadas.

### 2.3.2 Lodo de galvanoplastia

O lodo de galvanoplastia ou lodo galvânico, é o resíduo sólido gerado após o tratamento dos efluentes líquidos, provenientes da etapa de pré-tratamento e tratamento químico das peças galvanizadas. As águas provenientes dos banhos químicos são encaminhadas para a estação de tratamento de efluentes das indústrias, onde ocorre o tratamento das mesmas, com a geração de um lodo ou lama que contém principalmente altas concentrações de metais pesados, tais como níquel, cobre, zinco, ferro, cromo, entre outros (CHEN *et al.*, 2011; OLIVEIRA, 2007; TELOEKEN, 2011).

O lodo é o resíduo gerado em maior quantidade pelas indústrias do setor galvanotécnico, é um material muitas vezes pastoso com grande quantidade de água em sua composição. É classificado como resíduo sólido Classe I – Perigoso (ABNT NBR 10004, 2004).

Segundo Borgo (2005) e Kuchar (2007), além da alta concentração de metais (que pode variar de acordo com o tipo de recobrimento e método galvanotécnico utilizado), na composição do lodo também podem estar presentes compostos químicos em diferentes formas, tais como, hidróxidos, óxidos hidratados, sais dos metais das linhas de tratamento superficial em questão, sais solúveis de metais pesados, além de carbonatos, sulfatos e fosfatos de cálcio quando a neutralização é realizada com carbonato de cálcio.

O lodo pode conter ainda materiais inertes, principalmente SiO<sub>2</sub>, proveniente de silicatos alcalinos dos banhos de limpeza, de contaminações do óxido hidratado de cálcio, utilizado para neutralização, bem como de impureza em geral. Podem ainda estar presentes complexos de metais como cianetos, quando, durante a oxidação de cianeto

com compostos clorados, se formarem complexos metálicos insolúveis e não-oxidáveis, como, por exemplo, ferrocianeto de zinco.

Por ser considerado um resíduo sólido perigoso, o lodo galvânico deve ser disposto em aterros para resíduos industriais perigosos. A sua disposição inadequada representa riscos de contaminação do solo, lençol freático e águas superficiais. O local de armazenamento temporário também deve oferecer condições para o confinamento seguro, até que o lodo seja encaminhado ao tratamento ou à disposição final (TOCCHETO, 2004).

Como na maioria das vezes, o lodo é um material pastoso, deve ocorrer a retirada do seu excesso de umidade, por meio de adensadores ou filtros prensa, antes do acondicionamento e destinação final, pois geralmente paga-se pelo quilo de lodo a ser depositado nos aterros (PONTES, 2000).

O co-processamento de lodo galvânico em fornos de cimento também surgiu como alternativa para o tratamento desse resíduo, porém em muitos estados brasileiros essa prática não é permitida pelos órgãos ambientais responsáveis.

## **2.4 Tecnologias de tratamento de resíduos industriais**

No gerenciamento de resíduos sólidos industriais a reciclagem, a reutilização, o tratamento e a disposição final constituem as últimas etapas do sistema de gestão. Essas etapas apresentam grande importância principalmente no que diz respeito à minimização e eliminação desses resíduos, tornando-os menos perigosos se expostos ao ambiente.

A preocupação com o tratamento e destinação dos resíduos sólidos industriais está intimamente ligada aos prejuízos ambientais e à saúde pública que podem vir a acarretar se feitos de forma inadequada. Dentre esses prejuízos pode-se destacar a poluição do ar, poluição do solo, poluição das águas superficiais e subterrâneas, proliferação de vetores, contaminação da biota, desvalorização imobiliária, descaracterização paisagística e desequilíbrio ecológico, etc.

Define-se por tratamento de resíduos sólidos qualquer processo em que haja alteração nas características (físicas, químicas ou biológicas), composição, ou propriedade de um resíduo, tornando-o menos perigoso ao ambiente. Um tratamento pode neutralizar o resíduo, reciclá-lo e até recuperá-lo (EPA, 1984).

Tratar os resíduos sólidos industriais é transformá-los de forma que possam ser reutilizados ou dispostos em condições mais seguras e ambientalmente corretas, preservando tanto a saúde pública como o ambiente. Em alguns casos, o processo de tratamento é utilizado para tornar tais resíduos inertes.

Entretanto, o tratamento propriamente dito só se faz necessário se os resíduos gerados são impossíveis de serem reciclados ou reaproveitados, como materiais pela própria indústria ou outras. Neste caso, a caracterização e classificação dos resíduos devem ser realizadas de acordo com as normas ABNT NBR 10004 (2004), NBR 10005 (2004), NBR 10006 (2004) e NBR 10007 (2004), para se estudar e propor a melhor alternativa para seu tratamento e disposição final (SIMIÃO, 2011).

Segundo Tocchetto (2010), o tratamento é voltado principalmente para o processamento de resíduos perigosos, com o objetivo de redução ou eliminação de periculosidade; a imobilização de componentes perigosos, fixando-os em materiais insolúveis e, a redução de volume para a disposição. Os principais objetivos do tratamento são:

- Conversão dos constituintes tóxicos em formas menos perigosas ou insolúveis;
- Alteração da estrutura química facilitando sua incorporação ao ambiente;
- Destruição dos compostos tóxicos;
- Separação de frações tóxicas, reduzindo volume e periculosidade (GOMES, 2003; TOCCHETO, 2010).

No entanto, se for levado em conta os princípios da Ecologia Industrial, bem como das legislações sobre resíduos sólidos mais modernas, o tratamento deve ser voltado para qualquer tipo de resíduo gerado, sobretudo com vistas ao seu reaproveitamento.

Os tipos de tratamentos de resíduos podem ser divididos em: tratamentos físicos, que englobam vários métodos de separação de fases; tratamentos químicos, que se baseiam essencialmente em transformações químicas; tratamentos biológicos, em que ocorre a degradação dos compostos por meio de microrganismos; tratamentos térmicos, em que se utiliza o calor para a destruição de determinados compostos ou ainda tratamentos mistos. Ainda de acordo com Tocchetto (2010), os diversos tratamentos podem ser realizados, alternativamente, em locais distintos:

- Junto à própria fonte geradora;

- Em outra instalação que tenha interesse em utilizar o material recuperado;
- Em instalações especializadas em tratamento.

Os processos de tratamento, na maioria das vezes, são constituídos por uma sequência de operações unitárias químicas, físicas ou biológicas, essas operações podem ser classificadas como tecnologias destrutivas ou de remoção (TOMAZ, 2006).

É comum proceder ao tratamento de resíduos industriais com vistas à sua reutilização ou, pelo menos, sua inertização. Contudo, dada a diversidade dos mesmos, não existe um processo pré-estabelecido, havendo sempre a necessidade de se realizar uma pesquisa e o desenvolvimento de processos economicamente viáveis.

Com relação à legislação sobre tratamento e disposição de resíduos sólidos industriais no Brasil, pode-se citar a Resolução nº 313 (2002) CONAMA que dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais, que apresenta em seu anexo III os códigos para tratamento, reutilização, reciclagem e disposição final, podendo ser utilizado como referência para definir os tipos de tratamento, reutilização e disposição final aplicáveis aos resíduos. A Tabela II.5 apresenta os tipos de tratamento de resíduos citados na referida resolução.

Tabela II.5 – Códigos e tipos de tratamento para resíduos sólidos industriais

<i>Código</i>	<i>Tratamento</i>	<i>Código</i>	<i>Tratamento</i>
<i>T01</i>	Incinerador	T11	Destoxificação
<i>T02</i>	Incinerador de Câmara	T12	Neutralização
<i>T05</i>	Queima a céu aberto	T13	Adsorção
<i>T06</i>	Detonação	T15	Tratamento biológico
<i>T07</i>	Oxidação de cianetos	T16	Compostagem
<i>T08</i>	Encapsulamento/fixação química ou solidificação	T17	Secagem
<i>T09</i>	Oxidação química	T18	<i>Landfarming</i>
<i>T10</i>	Precipitação	T19	Plasma térmico

Fonte: Resolução 313 (2002) CONAMA.

Como um dos enfoques do presente trabalho é o tratamento de resíduos sólidos industriais por meio das técnicas de encapsulamento/fixação química mais conhecida como estabilização/solidificação, a seguir, será descrito algumas das utilizações e

características desses processos, com destaque para o processo de estabilização/solidificação de resíduos em matrizes de cimento.

#### **2.4.1 Processos de estabilização/solidificação de resíduos sólidos**

De acordo com Environmental Protect Agency (EPA, 1993), o termo estabilização/solidificação refere-se a uma categoria de processo de tratamento de resíduos que está cada vez mais sendo utilizada no tratamento de uma ampla variedade de resíduos, tanto sólidos quanto líquidos.

A estabilização refere-se ao processo de conversão do resíduo para uma forma quimicamente mais estável. Essa conversão pode acontecer durante a solidificação e quase sempre envolve reações físico-químicas para transformar o contaminante em uma forma menos móvel e tóxica. É um processo que envolve reações químicas que reduzem a lixiviação do resíduo perigoso, imobilizando os componentes químicos e diminuindo a solubilidade, mobilidade e toxicidade do mesmo, tornando-o menos prejudicial (SHI e SPENCE, 2004; EPA, 1995).

Solidificação refere-se a um processo que vincula o meio contaminado com um reagente/aglomerante, alterando suas propriedades físicas e aumentando as propriedades mecânicas, diminuindo a sua permeabilidade e encapsulando os contaminantes para formar um material sólido (SHI e SPENCE, 2004). O termo solidificação, também conhecido como encapsulamento, refere-se à técnica que altera as propriedades de um resíduo líquido, pastoso ou sólido para um monólito de alta integridade estrutural. A encapsulação pode ser de resíduos finos (microencapsulação) ou de grandes blocos (macroencapsulação). A solidificação não envolve necessariamente uma interação química entre os resíduos e o reagente/aglomerante utilizado, mas deve blindar mecanicamente os resíduos dentro da estrutura sólida (EPA, 1995).

Estes tratamentos são comumente indicados para resíduos perigosos gerados em grandes quantidades, mas alguns tipos de resíduos não perigosos também podem ser tratados por essa técnica, quando o objetivo for facilitar o manuseio do resíduo ou dificultar a perda de constituintes indesejáveis, que possam vir a contaminar a água subterrânea, quando dispostos no solo (SIMIÃO, 2011).

Contudo, em geral, essa técnica é eficaz para resíduos inorgânicos, não sendo recomendada, via de regra, para o tratamento de resíduos com contaminação orgânica,

devido às interações desfavoráveis que ocorrem entre os materiais orgânicos e a matriz de agente ligante.

De acordo com Simião (2011) a tecnologia de estabilização/solidificação pode ser empregada para a imobilização de diversos metais pesados, certos radioisótopos, solos contaminados, vários tipos de lodos e resíduos sólidos.

Existem vários processos e técnicas de estabilização /solidificação, sendo que os principais são: a base de cimento, à base de cal e materiais pozolânicos (exceto cimento), a base de argilas, polímeros orgânicos, encapsulamento em invólucro inerte, vitrificação e autossolidificação (PABLOS, 2008).

As técnicas de estabilização/solidificação a base de cimento e pozolanas têm sido mais utilizadas para o tratamento de materiais perigosos do que outras tecnologias de tratamento, enquanto que as técnicas à base de ligantes termoplásticos e polímeros também têm sido utilizadas para inertizar alguns resíduos perigosos, porém em menor escala (EPA, 1989).

Como o objetivo do presente trabalho é o estudo da incorporação de resíduos em matrizes cimentícias para seu tratamento/aproveitamento por meio das técnicas de estabilização/solidificação, será dada maior ênfase ao processo a base de cimento Portland.

#### **2.4.1.1 Estabilização/solidificação em matriz cimentícia**

A técnica de estabilização/solidificação à base de cimento é um processo no qual os resíduos são misturados com cimento portland e água, adicionada à mistura, para assegurar as reações de hidratação necessárias para cimentar as ligações. Os resíduos são incorporados à matriz de cimento e, em alguns casos, sofrem alterações físico-químicas que reduzem a sua mobilidade na matriz. Normalmente, hidróxidos de metais bem menos solúveis do que as espécies iônicas dos metais são formados. Pequenas quantidades de cinzas volantes, silicato de sódio, bentonita, ou aditivos podem ser adicionados ao cimento para melhorar o processo (EPA, 1989).

É um processo que tem sido aplicado no tratamento de resíduos galvânicos contendo metais pesados, tais como, cádmio, cromo, cobre, chumbo, níquel e zinco. Também pode ser usado para estabilizar resíduos complexos que contenham óleos, lamas oleosas, resinas, vinil cloreto, dicloreto de etileno, amianto, sulfetos, entre outros

materiais (EPA, 1989). A Tabela II.6 apresenta exemplos de aplicações da técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento.

Tabela II.6 – Exemplos de aplicação da técnica de estabilização/solidificação em matrizes de cimento.

<i>Indústria/atividade</i>	<i>Tipo de resíduo</i>	<i>Poluente</i>
Galvanoplastia	Torta, lama	Cr, Pb, Cu, Ni, Zn
Componentes elétricos	Torta, lama	C, Sn, Pb
Químicos orgânicos	Líquido	Pb, Ti
Lavagem de gases	Líquido	Sulfatos alcalinos
Catálise petroquímica	Sólido	Co, Mo, Ni
Tratamentos metálicos	Líquido	Zn, Mg, Ba, ácidos
Farmacêutica	Torta, lama	Zn, Hg, Ba, Be
Acabamento metálico	Sólido	Cu, Ni, Zn
Incineração	Torta, lama	Mn, Fe, Pb, Zn, V
Decapagem ácida	Torta, lama	Cr, Zn, Fe, ácidos

Fonte: PABLOS, 2008 (adaptado).

As vantagens da utilização da técnica de estabilização/solidificação a base de cimento segundo Pablos (2008) e Tomaz (2006), são:

- Matéria-prima abundante disponível para a realização do tratamento;
- A tecnologia de controle das misturas e manuseio do cimento são bem conhecidos;
- A secagem e a desidratação dos resíduos não são necessárias, visto que o cimento precisa de água para sua hidratação e posterior endurecimento;
- O sistema é tolerante à maioria das variações química;
- O cimento, dada sua alcalinidade, pode neutralizar ácidos e não é afetado por oxidantes fortes, tais como, nitratos ou cloretos;
- As características de lixiviação do produto final, se necessário, podem ser melhoradas por meio de revestimento selante;
- A quantidade de cimento usada pode variar, permitindo assim que os produtos finais tenham uma alta capacidade de suporte e uma baixa permeabilidade.

As desvantagens do processo são (PABLOS, 2008; TOMAZ, 2006):

- A necessidade de quantidades relativamente grandes de cimento, o que em parte é compensado pelo baixo custo do material;

- O peso e o volume e do produto final são, normalmente, o dobro do de outros processos de fixação;
- Necessidade de aterros bem projetados e construídos para a disposição de produtos finais não revestidos;
- Necessidade de efetuar um pré-tratamento ou utilizar cimentos especiais de custo mais elevado ou aditivos, caso os resíduos contenham grandes quantidade de impurezas que afetem o endurecimento e a cura da mistura resíduo-cimento, tais como, boratos e sulfatos;
- Formação de amônia a partir do íon amônio, devido à alcalinidade do cimento.

O cimento é uma mistura heterogênea formada principalmente pelos seguintes compostos (YOUSUF *et al.*, 1998):

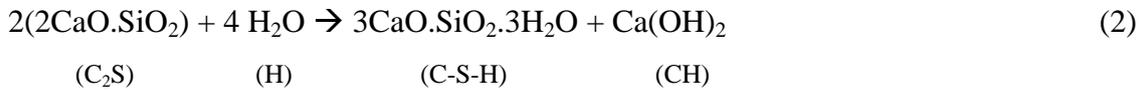
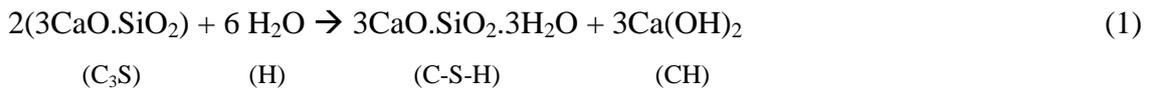
- 50-70% de  $C_3S$  - silicato tricálcico ( $3CaO.SiO_2$ ), conhecido como alita;
- 20-30% de  $C_2S$  - silicato dicálcico ( $2CaO.SiO_2$ ), conhecido como belita;
- 5-12% de  $C_3A$  - aluminato tricálcico ( $3CaO.Al_2O_3$ );
- 5-12% de  $C_4AF$  - ferroaluminato tetracálcico ( $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ ).

Alita ( $C_3S$ ): principal mineral que contribui para a resistência mecânica do cimento. Reage mais rapidamente com a água; Belita: ( $C_2S$ ) reage mais lentamente com a água porém, após períodos maiores (aproximadamente um ano), atinge a mesma resistência mecânica que a alita; Aluminato tricálcico ( $C_3A$ ): reage muito rapidamente com a água, porém sem apresentar fortes propriedades hidráulicas. Em combinação com os silicatos, o mesmo eleva a resistência inicial do cimento; Ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ): apresenta taxas inicialmente altas de reatividade com a água. Em idades mais avançadas, taxas baixas ou muito baixas. Contribui pouco para a resistência mecânica.

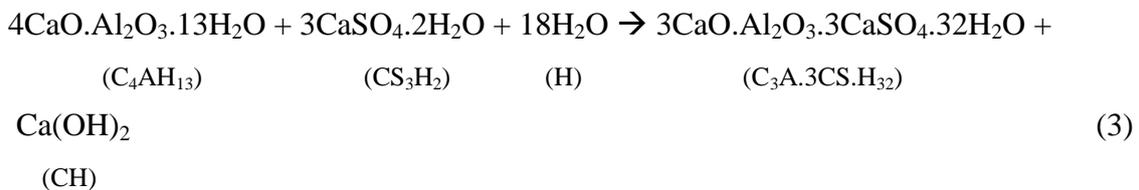
A hidratação do cimento leva à formação dos seguintes produtos principais (YOUSUF *et al.*, 1995):

- 20-25% de  $Ca(OH)_2$  (hidróxido de cálcio ou CH, de “Calcium Hydroxide”);
- 60-70% de  $3CaO.2SiO_2.3H_2O$  (tobermorita ou silicatos de cálcio hidratado ou C-S-H, de “Calcium-Silicate-Hydrate”);
- 5-15% de outras fases sólidas como trissulfoaluminato de cálcio (etringita -  $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$ ), o monossulfoaluminato de cálcio e outros.

As reações que ocorrem na hidratação do cimento para a obtenção de portlandita (CH) e a tobermorita (C-H-S) são apresentadas nas equações (1) e (2) (LANGE *et al.*, 1998; SPENCE e SHI, 2005):



Na equação (1), o silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) após a hidratação, forma silicato de cálcio hidratado (C-S-H) mais hidróxido de cálcio (CH). Do mesmo modo, na equação (2), o silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ) após hidratação forma também silicato de cálcio hidratado (C-S-H) mais hidróxido de cálcio (CH). A equação (3) apresenta outra reação de hidratação em que o aluminato de cálcio hidratado ( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ) reage com o gesso ( $\text{CS}_3\text{H}_2$ ) presente no cimento para formar o trissulfoaluminato de cálcio ( $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CS} \cdot \text{H}_{32}$ ) conhecido como etringita:



O principal produto de hidratação, C-S-H, tem uma composição variável e a sua morfologia é dependente da razão Ca/Si, das condições de fixação e da razão água/material sólido. O processo de cimentação fixa a água livre, aumenta o pH e altera outras propriedades químicas da mistura, reduz a área superficial e aumenta a resistência. Todos estes mecanismos contribuem para a melhoria na qualidade do resíduo tratado (EPA, 1993).

Quando misturado com água, o cimento é hidratado, formando posteriormente um sólido rígido. A hidratação acontece em dois estágios, sendo que no primeiro ocorre a formação de uma membrana na superfície das partículas de silicato de cálcio e no segundo, após a cura inicial, observa-se em cada grão do cimento o crescimento de cristais que se irradiam por todo o espaço intersticial. Tem-se, dessa forma, um aumento no comprimento e no número de cristais, que gradualmente começam a emaranhar-se, uns aos outros e, quando cessa o seu crescimento, começam a unir-se lateralmente formando-se lâminas contínuas do material. Essa matriz cristalina, incorpora os agregados ou os resíduos adicionados à massa monolítica (CETESB, 1985 *apud* PABLOS, 2008).

A Figura II.6 apresenta os principais produtos da hidratação do cimento.

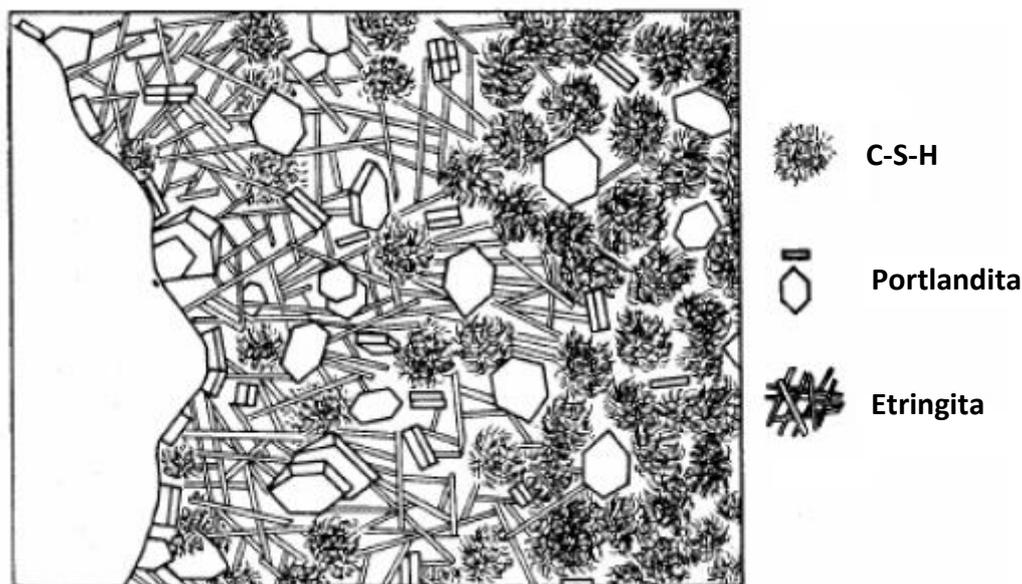


Figura II.6 – Principais produtos da hidratação do cimento (adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2008)

Segundo Mackay e Emery (1992), quando o cimento é hidratado, forma-se cerca de 20-30% de hidróxido de cálcio o que leva à formação de uma solução sólida nos poros com pH em torno de 12-13. Esse meio alcalino propicia a formação de compostos insolúveis como hidróxidos e silicatos metálicos. Os hidróxidos metálicos são fortemente estáveis na faixa de pH 7 a 11, e os silicatos numa faixa maior.

A imobilização de resíduos no processo estabilização/solidificação pode envolver mecanismos físicos, químicos, ou a combinação dos dois. A estabilização física (solidificação ou encapsulação) muda a forma física, mas não necessariamente causa ligação química dos constituintes do resíduo. A estabilização química muda os estados químicos dos constituintes do resíduo transformando-os em formas menos solúveis em água.

De acordo com Chen *et al.*, (2009) a solidificação/estabilização de metais em matrizes de cimento pode ocorrer por meio de vários mecanismos, tais como adsorção, incorporação química (complexação de superfície, precipitação, co-precipitação), micro ou macroencapsulação.

A adsorção de metais nos produtos de hidratação do cimento inclui a adsorção física e química. O fenômeno da adsorção física ocorre quando os contaminantes em solução são atraídos para a superfície das partículas de cimento em função do equilíbrio

de cargas. A adsorção química refere-se à alta afinidade e adsorção específica, as quais geralmente ocorre por meio de ligações covalentes.

O microencapsulamento é um processo de adsorção física ou aprisionamento dos contaminantes nos espaços dos poros de um material cimentante. À medida que o tempo passa, o resíduo e a matriz podem eventualmente se tornar um material homogêneo, embora isto deva ocorrer em uma escala de tempo de milhares de anos (CONNER, 1990).

O termo macroencapsulação descreve um processo de revestimento de um resíduo sólido ou cimentado com uma camada impermeável, tal como betume (termoplástico) ou sílica amorfa. O sucesso desse método depende tanto da eficiência das reações de revestimento como da mistura como um todo. A macroencapsulação também pode se referir à contenção de resíduos sólidos de grande dimensão, como em um tambor fechado.

No processo de estabilização/solidificação à base de cimento, muitas vezes, o mecanismo de imobilização de metais pesados acontece por meio da precipitação química das espécies de baixa solubilidade, que é função do pH do sistema (CHEN, *et al.*, 2009). Os metais podem precipitar como hidróxidos, óxidos, carbonatos, sulfatos e silicatos (HILLS *et al.*, 1994; JAMES, 1996; CONNER e HOEFFNER, 1998). Dentro do processo a solubilidade do metal pode variar expressivamente dependendo das reações que podem acontecer entre os compostos do resíduo e do cimento.

Em um sistema de estabilização/solidificação, durante o mecanismo de precipitação de produtos, os íons metálicos podem ser adsorvidos na superfície do cimento formando uma rede de solução sólida, alterando suas estruturas (cristalinidade, tamanho de partícula), e solubilidade (CHEN *et al.*, 2009).

Vários estudos de estabilização/solidificação de resíduos em matrizes de cimento mostram que os contaminantes interferem nas reações de hidratação retardando ou acelerando a solidificação da pasta de cimento (POON *et al.*, 1985; CIOFFI *et al.*, 2002; DWECK *et al.*, 2007). Poon *et al.*, (1985) relataram que os metais que formam hidróxidos solúveis comportam-se como aceleradores nas reações de hidratação e metais que formam hidróxidos insolúveis retardam a hidratação do cimento. O retardamento tem sido atribuído à redução da permeabilidade causada por reações destes produtos, ou seja, a precipitação de géis coloidais contendo metal nas superfícies dos grãos de cimento (CHEN *et al.*, 2009).

Para exemplificar a retenção de alguns metais por estabilização/solidificação, Conner (1990) e Wiles (1987) realizaram um trabalho para tratar resíduos sólidos industriais perigosos com pozolanas, cinzas volantes e cimento, mostrando como ocorre a conversão e o aprisionamento dos contaminantes (Figura II.7).

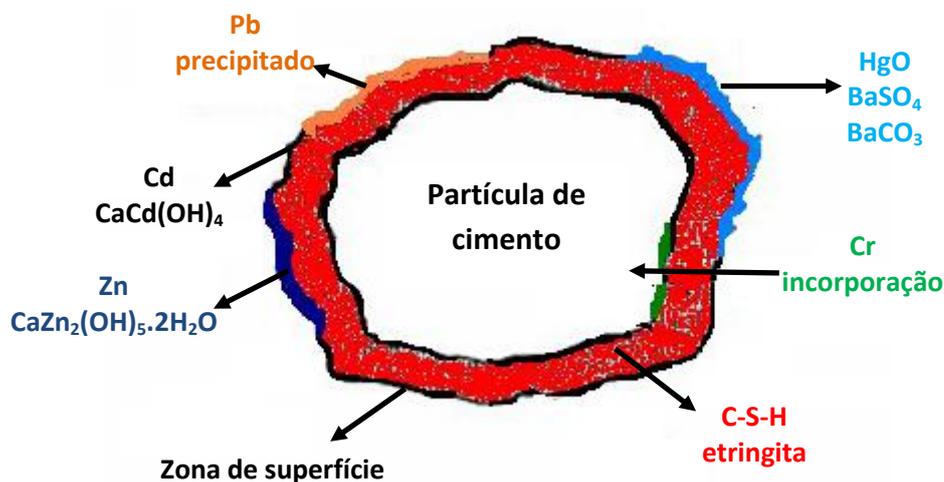


Figura II.7 – Hidratação do cimento e o aprisionamento de contaminantes (adaptado de CONNER, 1990)

A Figura II.7 retrata a definição de estabilização/solidificação, pois, os contaminantes estão retidos ou aprisionados no interior da partícula de cimento, além de ocorrer reações químicas entre os contaminantes e aglomerantes ou processos de retenção física dos contaminantes. Nessa figura verifica-se que o chumbo ( $\text{Pb}^{2+}$ ), cádmio ( $\text{Cd}^{2+}$ ) e zinco ( $\text{Zn}^{2+}$ ) são precipitados na zona de superfície do composto hidratado, enquanto que o cromo ( $\text{Cr}^{3+}$ ) pode ser incorporado no interior do composto, especialmente no interior do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que apresenta a fórmula molecular  $\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (CONNER, 1990).

Os íons cádmio ( $\text{Cd}^{2+}$ ) e zinco ( $\text{Zn}^{2+}$ ) foram precipitados na matriz, reagindo com a portlandita -  $\text{Ca(OH)}_2$ , resultando na substituição dos íons  $\text{Cd}^{2+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$  e gerando um duplo composto de  $\text{CdCa(OH)}_4$  e  $\text{CaZn}_2(\text{OH})_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Segundo Conner (1990) quando se utiliza cimento Portland comum (CPC) para E/S de resíduos sólidos industriais perigosos o pH da matriz favorece a conversão de cátions em hidróxidos, óxido e carbonatos insolúveis, incorporando íons metálicos à estrutura cristalina da matriz de cimento. O óxido de mercúrio e os sais de bário permanecem na superfície da partícula de cimento, pois com a elevação do pH os cátions de bário ( $\text{Ba}^{2+}$ ) e mercúrio

( $\text{Hg}^{2+}$ ) são convertidos para a forma de óxido ( $\text{HgO}$ ) e carbonatos insolúveis ( $\text{BaSO}_4$  e  $\text{BaCO}_3$ ) (BRITO, 2007).

O processo de estabilização/solidificação baseado em cimento e sua eficácia, tem sido amplamente estudado e discutido, principalmente para o tratamento de rejeitos contendo metais pesados, obtendo como resultado a redução da concentração e da capacidade tóxica desses metais.

Barth e Percin (1990) em estudos realizados em solos contaminados, indicaram a estabilização/solidificação a base de cimento como eficaz para imobilização dos seguintes metais: arsênio, chumbo, zinco, cobre, cádmio e níquel.

Cioffi *et al.*, (2002) estudaram a estabilização/solidificação de lama galvânica contendo cádmio, cromo e níquel em matriz de cimento, embora os contaminantes tenham interferido nas reações de hidratação e retardado o endurecimento da mistura, os autores obtiveram bons resultados nos ensaios de lixiviação para todos os metais, utilizando até 40% de resíduos na mistura com cimento.

A avaliação do tratamento por solidificação/estabilização de resíduos da indústria curtumeira e de coleta de água da chuva de estradas, em matrizes cimentícias e argilosas, foi realizado por Pinto (2005). Os resíduos continham os metais cádmio, chumbo, cobre e zinco. Foram preparados corpos-de-prova com cimento e argilas brasileiras e comerciais, em várias proporções dos resíduos. Os resultados mostraram que os resíduos participaram da hidratação do cimento, retardando e/ou reagindo com alguns compostos cimentícios. A presença das argilas favoreceu o encapsulamento dos metais, o que foi verificado por meio dos ensaios de compressão e lixiviação que permaneceram dentro dos valores exigidos pela legislação ambiental.

O trabalho de Shopia e Swaminathan (2005) tratou da avaliação da estabilidade mecânica e química de lodo de galvanoplastia contendo cromo em matrizes de cimento. Os autores realizaram ensaios de resistência mecânica e lixiviação para a verificação da imobilização do metal. As análises de lixiviação nas peças de concreto solidificadas contendo o resíduo mostraram que o cromo foi imobilizado pelo aglomerante utilizado mantendo as concentrações lixiviadas abaixo do limite estipulado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA).

Katsioti *et al.*, (2009) estudaram a imobilização de lodo de esgoto contendo Cu, Zn e Pb em matrizes de cimento com adição de bentonita. A metodologia de análise incluiu difração de raios-x, termogravimetria, microscopia eletrônica de varredura,

análise de infravermelho e ensaios de lixiviação. Os pesquisadores concluíram que a utilização de uma mistura de 20% de bentonita, 30% de cimento e 50% de lodo de esgoto foi suficiente para estabilizar os metais presentes no resíduo mantendo as concentrações livixiadas abaixo dos valores estipulados pela legislação ambiental americana (USEPA). A mistura obtida também pode ser aplicada na construção de bases para aterros sanitários e na fabricação de blocos para construção civil.

Pablos (2008), em tese de doutorado, estudou a reciclagem do resíduo sólido gerado pelo descarte das areias de fundição aglomeradas com argila e sua estabilização em matrizes solidificadas de cimento, com o intuito de aplicação na construção civil. Utilizaram-se adições de argila bentonita e sílica ativa nas argamassas para melhoria do processo de imobilização dos metais pesados. Os resultados demonstraram que a eficiência de fixação dos metais Al, Fe e Cr aumentou com a adição tanto de bentonita como de sílica. Tijolos de alvenaria foram fabricadas com as composições que apresentaram os melhores resultados, mostrando viabilidade técnica, para a aplicação na execução de alvenarias, no que diz respeito a resistência à compressão, absorção de água e solubilização, para a aplicação na execução de alvenarias.

Chen *et al.*, (2009) em seu trabalho de revisão sobre a imobilização de metais pesados em matriz de cimento, concluíram que as fases associadas formadas no processo de estabilização/solidificação contendo metais pesados, geralmente são amorfas ou misturas pouco cristalizadas variando a composição em nano escala, dificultando a caracterização dessas fases e o mecanismo dominante de fixação dos metais.

O trabalho de Pinto *et al.*, (2010) tratou do processo de estabilização/solidificação de resíduos de curtume contendo cromo. A estabilização do resíduo foi evidenciada por meio da reação do cromo com o hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento. Um estudo por ressonância magnética nuclear foi realizado e detectou-se que ocorreu um retardamento nas formulações do cimento com adição do rejeito. Em termos de resistência à compressão, o aumento da quantidade de resíduo adicionada diminuiu a resistência mecânica.

A imobilização do cobalto (II) foi investigada em várias matrizes de cimento utilizando a técnica de estabilização/solidificação. Henkal *et al.*, (2011b) concluíram que a presença de cloreto de cobalto nas pastas de cimento causaram um pequeno retardamento na reação de hidratação do cimento. As pastas de cimento com adição de

cloreto de cobalto também apresentaram altas taxas de imobilização dos íons de cobalto, após 180 dias de solidificação.

Os mesmos autores também estudaram a estabilização/solidificação de níquel (III) em diferentes pastas de cimento na presença de cloreto de níquel, e concluíram que houve um pequeno retardamento no processo de hidratação que foi diminuído à medida que aumentou o acréscimo do cloreto de níquel, devido ao efeito de aceleração dos íons cloreto na hidratação. Foram realizados, ensaios para a determinação da água combinada, ensaios de difração de raios-x, lixiviação e compressão. Detectou-se, que geralmente o grau de imobilização do níquel em várias pastas foi bastante alto (Henkal *et al.*, 2011a).

Melchert (2012) estudou a estabilização/solidificação de resíduos de catalisadores contendo níquel e alumínio em cimento Portland tipo II. Foi verificado que nos estágios iniciais de hidratação das pastas contendo os rejeitos ocorreram efeitos de retardamento e aceleração, respectivamente, devido à presença de níquel e alumínio. Os ensaios de lixiviação realizados nas argamassas aos 28 dias de cura mostraram valores abaixo dos limites permitidos para a concentração final de Ni e Al, já os ensaios de resistência à compressão das pastas apresentaram resultados aceitáveis para o possível uso na construção civil.

## **2.5 Blocos de concreto para pavimentação (BCP)**

Os blocos de concreto para pavimentação (BCP), também conhecidos como pavers, são peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação intertravada, amplamente utilizada em países, tais como, Estados Unidos, Espanha, Austrália, África do Sul e Brasil, com o objetivo da pavimentação de praças, passeios, ruas, avenidas, estacionamentos, pátios industriais, etc.

Os primeiros BCP's foram confeccionados no final do século XIX e os primeiros avanços no desenvolvimento de sua utilização, ocorreram na Holanda e Alemanha no período de reconstrução dos países após a Segunda Guerra Mundial. A partir de 1950 houve uma evolução nos modelos de fôrmas existentes para a fabricação dos blocos, primeiramente as peças imitavam tijolos e pedras aparelhadas utilizadas na época, objetivando obter sua substituição gradual. Posteriormente foi reconhecido que os blocos forneciam melhor uniformidade que as peças aparelhadas, além de não

necessitar de reaparelhamento antes do assentamento, tinham menores custos e homogeneidade dimensional (FIORITI, 2007).

A partir da década de 1990, o bloco de concreto para pavimentação, que era até então comum na Europa, passou a ser amplamente utilizado no Brasil, tanto em vias quanto em calçamentos.

Desde 1950 até os dias de hoje, os blocos de concreto se desenvolveram de tal modo que praticamente todos os nichos da engenharia e todos os lugares do mundo foram permeados por este tipo de pavimento, em maior ou menor quantidade. Atualmente existe uma gama de formas, tamanhos, cores, texturas e padrões de assentamento para os blocos (como pode ser observado na Figura II.8), permitindo a sua integração arquitetônica e paisagística com o lugar onde será utilizado.

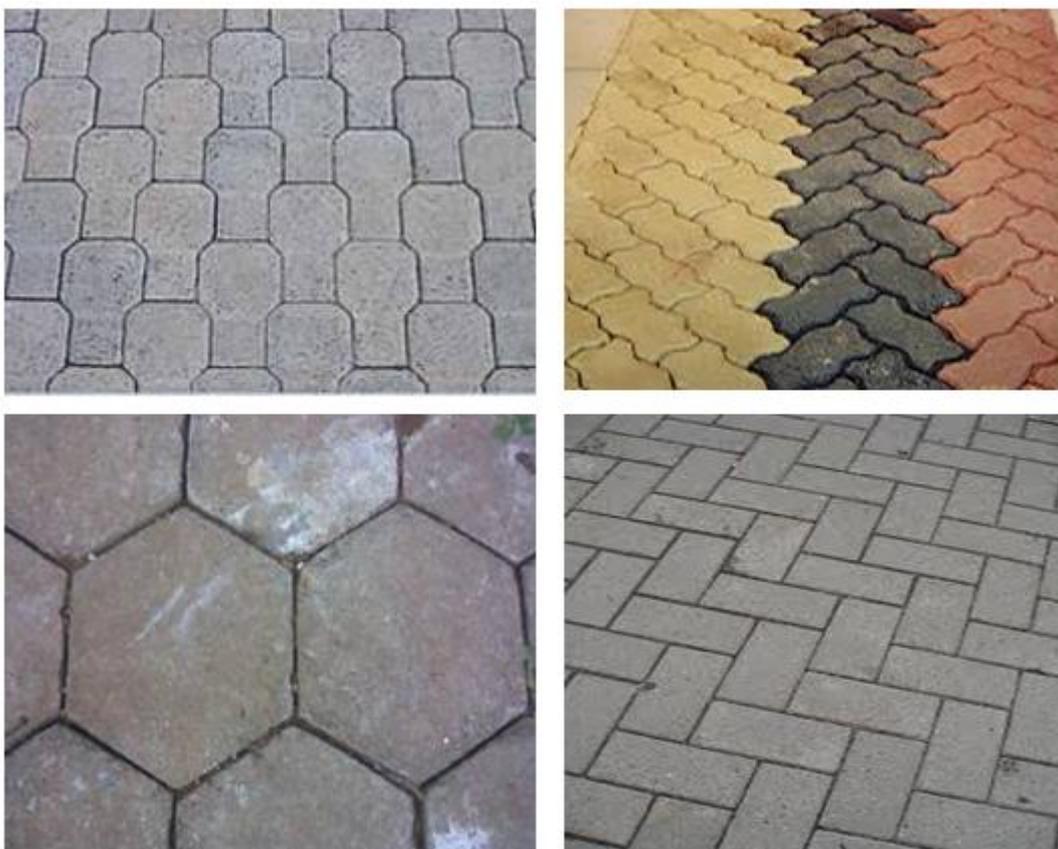


Figura II.8 – Diferentes formas, cores e padrões de assentamento dos blocos de concreto para pavimentação (Fonte: INTERPAVI, 2012)

O pavimento em blocos pré-moldados de concreto é indicado para as mais variadas aplicações dentre as quais se podem destacar:

- Vias urbanas
- Paradas de coletivos

- Estradas
- Pátios de manobras e estacionamento
- Pisos de áreas industriais
- Galpões
- Calçadas, praças e jardins
- Faixas demarcatórias e de sinalização
- Pisos rurais (currais, bebedouros, etc.)
- Depósitos de mercadorias
- Postos de gasolina
- Áreas de exposições e feiras
- Rampas íngremes

Existem casos especiais em que a aplicação desse tipo de pavimento torna-se particularmente recomendada, como, por exemplo, (INTERPAVI, 2012):

- Pavimento sob os quais certamente se instalarão no futuro redes subterrâneas de água, esgoto, telefones, etc;
- Áreas sujeitas à manutenção subterrânea, tais como postos de gasolina, etc.
- Pavimentação e áreas sujeitas a futuro remanejamento do "layout";
- Trechos de pavimento construídos como alerta de perigo, antecedendo curvas, cruzamentos, passagens de pedestres ou de nível, e outros;
- Trechos de pavimentos cujo subleito não oferece boas condições de suporte, sem possibilidade de remoção do solo ou de elevação do greide;
- Pavimentos sobre aterros recentemente concluídos e sujeitos a recalques.

As principais vantagens da pavimentação com blocos de concreto são:

- Permeabilidade e conforto térmico: harmonia com o ambiente;
- Utilização imediata: liberação para o tráfego logo após sua aplicação;
- Facilidade de manutenção: as peças podem ser removidas e reutilizadas;
- Baixo custo de manutenção: sendo recomendado para regiões em fase de crescimento;
- Segurança: a superfície do bloco é antiderrapante;
- Versatilidade arquitetônica: vários modelos, cores e combinações;
- Fácil assentamento: com equipamentos de pequeno porte ou até manual;
- Durabilidade: altamente resistente ao clima e a agentes agressivos;
- Baixo custo de fabricação;

- Não exige mão-de-obra especializada;
- Adequadamente assentado, possui elevada vida útil.

Segundo Fioriti (2007), um pavimento de concreto pré-moldado pode ter até 25 anos de vida útil, desde que alguns requisitos mínimos sejam atendidos, como uma sub-base bem executada, blocos de qualidade e assentamento adequado.

Não apenas pelas vantagens técnicas que o bloco intertravado oferece, este material tem se consolidado no mercado também pela sua eficiência ambiental. Além de abrir a possibilidade de usar um resíduo na sua composição, o bloco é semipermeável, o que pode contribuir com a drenagem urbana (AMADEI, 2011).

Fioriti (2007) ressalta que o equilíbrio entre os aspectos ambientais, tecnológicos e econômicos, é o fator determinante para o amplo desenvolvimento desse sistema prático e confiável de pavimentação. A Figura II.9 mostra o uso de pavimentos intertravados na pavimentação de calçadas e estacionamento para veículos na Universidade Estadual de Maringá.

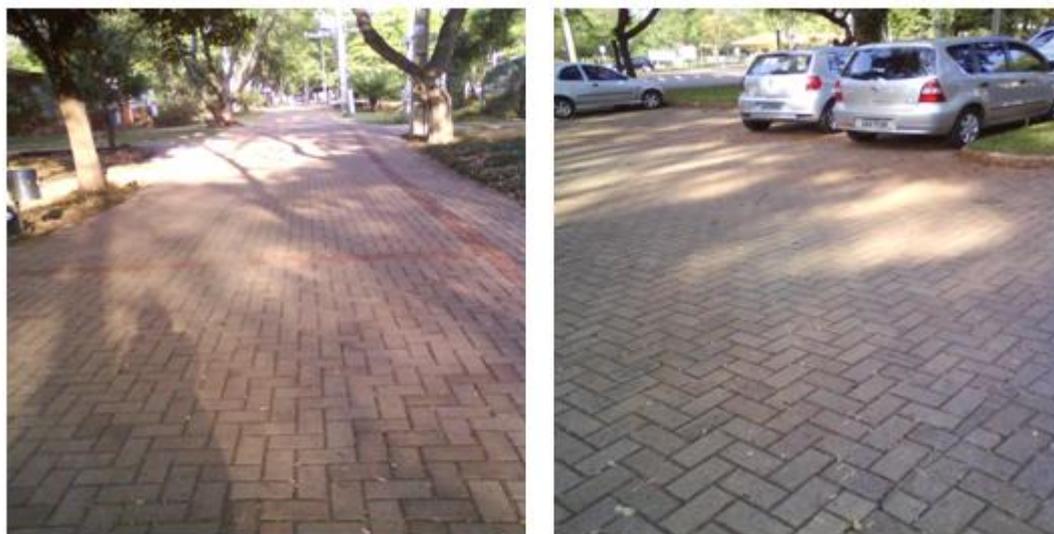


Figura II.9 – Pavimentação de calçadas e estacionamento com blocos de concreto

(Fonte: Arquivo pessoal da autora)

### **2.5.1 Produção dos Blocos de Concreto para Pavimentação – Materiais, Equipamentos e Dosagem**

De acordo com Hood (2006) na produção dos blocos de concreto, diversos fatores interferem na qualidade final destes, desde o maquinário utilizado até a

quantidade de água na mistura. Conhecer as propriedades requeridas, os materiais constituintes, a execução da dosagem e o processo de produção são fatores essenciais para o êxito do trabalho.

Os principais materiais e mais frequentemente utilizados para a produção dos BCP's são o cimento (aglomerante), agregado graúdo, agregado miúdo, água e eventualmente algum aditivo e pigmentos.

- **Cimento:** pode ser definido como um pó fino, composto por óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), sílica (SiO<sub>2</sub>) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), que possui propriedades aglomerantes e ligantes, sofrendo endurecimento sob a ação da água. Na forma de concreto, torna-se uma pedra artificial, que pode ganhar formas e volumes, de acordo com as necessidades de cada obra. Graças a essas características, o concreto é o segundo material mais consumido pela humanidade, superado apenas pela água (ABCP, 2012; MEHTA E MONTEIRO, 2008). Segundo Petterman (2006), as indústrias de pré-moldados vêm utilizando essencialmente três tipos de cimento para fabricação de suas peças de concreto: o de alta resistência inicial e resistente a sulfatos (CP V – ARI), o pozolânico (CP IV) e o composto com pozolana (CP II – Z). Porém há uma preferência pela utilização do CP V – ARI, pois, o mesmo proporciona uma alta resistência mecânica inicial nas primeiras idades de cura, requisito essencial para a rápida desforma e entrega dos pavers ao cliente final. A norma da ABNT NBR 9781 (2013) que dispõe sobre as condições exigíveis para a aceitação de peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação, menciona que o cimento utilizado para fabricação das peças, pode ser de qualquer tipo e classe, desde que obedeça as suas respectivas normas regulamentadoras.
- **Agregado Graúdo:** o termo agregado graúdo é utilizado para descrever partículas maiores do que 4,75 mm (retidas na peneira nº4), porém podem variar entre 4,75 mm a cerca de 50 mm. Os agregados graúdos empregados na fabricação de BCP são os provenientes do britamento de rochas estáveis (britas “0” ou “1”), pois proporcionam uma melhor aderência com a pasta de cimento, favorecendo a obtenção de resistências mecânicas elevadas (PETTERMAN, 2006).

- **Agregado Miúdo:** segundo Mehta e Monteiro (2008) o termo agregado miúdo é utilizado para descrever partículas menores que 4,75 mm, que podem variar entre 75  $\mu\text{m}$  (peneira nº 200) a 4,75 mm. Em geral os agregados miúdos utilizados tanto no concreto plástico como em concretos secos são areias provenientes de rios e jazidas naturais. Os fabricantes de BCP utilizam geralmente areias médias com módulo de finura variando entre 2,5 a 3,2 evitando areias grossas que dificultam a compactação devido ao fenômeno de interferência entre partículas. A distribuição das areias médias deve ser contínua, pois a falta de continuidade desse material pode comprometer seriamente a qualidade final dos blocos (OLIVEIRA, 2004).
- **Água:** de acordo com a norma da ABNT NBR 9781 (2013) a água utilizada na fabricação dos blocos deve ser limpa, isenta de produtos nocivos à hidratação do cimento. Oliveira (2004) menciona que a quantidade de água empregada no concreto seco gira em torno de 5 a 7,5%, porém, desde que não haja prejuízo na desforma e alteração no formato dos blocos, a quantidade de água ideal é a máxima possível compatível com a máquina vibro-prensa utilizada na moldagem dos blocos.

A dosagem do concreto, ou a determinação do “traço” (ou proporção dos componentes) dos materiais, é uma parte muito importante da fabricação dos blocos de concreto para pavimentação. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a dosagem do concreto, que é o conjunto de operações para o estabelecimento do traço, é o processo de obtenção da combinação correta de cimento, agregados, água, adições e aditivos, para produzir o concreto de acordo com as especificações dadas. Devido à inexistência de prescrição normativa para a dosagem de blocos para pavimentação, no Brasil grande parte dos fabricantes de blocos desenvolvem métodos de dosagem artesanalmente, por meio de tentativa e erro de acordo com as características particulares de cada máquina vibro-compressora utilizada na moldagem dos pavers.

Após a definição do traço, os materiais são misturados em betoneira e posteriormente enviados para os equipamentos de moldagem. Os equipamentos utilizados na moldagem de blocos são denominados máquinas vibro-prensas ou vibro-compressoras. Essa denominação advém do tipo de mecanismo empregado com que o material de dosagem penetra e preencha as fôrmas de aço do equipamento. Os benefícios da produção em escala com o uso desses equipamentos são: o controle na

homogeneidade das resistências mecânicas, textura, e dimensões que podem ser exercidos durante a fabricação dos produtos (FIORITI, 2007).

Existem vários tipos de vibro-prensas patenteadas e elas podem ser classificadas quanto ao processo de desforma como: vibro-prensa tipo poedeira, que são equipamentos dotados de pneus que fazem a desforma dos blocos no próprio piso; vibro-prensa com desforma sobre paletes, são equipamentos estáticos, em que a desforma ocorre sobre paletes, vibro-prensa com desforma em multicamadas e ainda vibro-prensas hidráulicas e pneumáticas (FIORITI, 2007). A Figura II.10 mostra uma máquina vibro-prensa pneumática com desforma sobre paletes.



Figura II.10 – Máquina vibro-prensa com desforma sobre paletes (Fonte: Arquivo pessoal da autora)

A sequência básica de funcionamento das vibro-prensas durante a moldagem dos blocos, resume-se em (MEDEIROS, 1993 apud HOOD, 2006):

- a) Preenchimento da gaveta alimentadora com mistura destinada à moldagem dos blocos;
- b) Preenchimento do molde metálico onde os blocos são moldados, com vibração;
- c) Compactação dos blocos por meio de extratores, acompanhada de nova vibração do molde, finalizando quando a altura desejada para os blocos é atingida;
- d) Desforma logo após o término da operação anterior. Nesta fase os extratores permanecem imóveis, enquanto o molde ascende, permitindo que os blocos permaneçam sobre a chapa onde foram moldados;

- e) A chapa com o blocos recém-moldados avança para frente da máquina, ou são retirados da mesma, enquanto uma nova chapa vazia ocupa seu lugar sob o molde;
- f) O molde metálico desce então para sua posição original, enquanto os extratores ascendem, preparando-se para um novo ciclo.

O processo seguinte à moldagem dos blocos de concreto é a cura, que corresponde ao conjunto de operações que visa proporcionar aos blocos, durante certo tempo, condições de umidade, temperatura e pressão necessárias a uma adequada reação de hidratação do cimento. A cura natural geralmente é utilizada na fabricação de blocos, em que as peças de concreto permanecem protegidas do vento e insolação direta, em local adequado, para evitar a evaporação excessiva da água, por pelo menos sete dias (HOOD, 2006).

### 2.5.2 Normas técnicas gerais sobre pavers

De acordo com Cruz (2003), os países europeus são os que têm mais tradição na utilização de pavers. Basicamente, as normas existentes em todo o mundo tiveram sua origem nas experiências de países europeus, como Alemanha, Holanda, Bélgica e França. Somente a partir da década de 1970, os Estados Unidos e Canadá apareceram no cenário internacional como países “exportadores” de equipamentos de fabricação e experiência tecnológica neste tipo de pavimentação.

Shackel (1990) apud Cruz (2003) cita que as especificações gerais para pavers compreendem cinco características imprescindíveis para seu controle:

- a. *Materiais* - que estabelece padrões de qualidade para os materiais utilizados na fabricação e execução das peças de concreto com o objetivo de garantir sua durabilidade. Normalmente cada país possui uma norma específica para esse quesito;
- b. *Tolerâncias dimensionais* – estabelece o controle das dimensões das peças para um bom assentamento e manutenção da pavimentação;
- c. *Resistência* – propriedade mecânica exigida na maioria das normas internacionais. A resistência à compressão dos pavers deve ser suficiente para garantir eficiência diante das ações solicitantes como, manuseio,

execução do pavimento, resistência à ação do tráfego e quaisquer outras formas de utilização;

- d. *Durabilidade* – tem relação com resistência à abrasão e capacidade de suportar ciclos de gelo e degelo em países com invernos rigorosos. Segundo Fioriti (2007), dessa análise, resultou que as revisões das normas internacionais em geral, têm indicado a necessidade de se realizar os ensaios de resistência à abrasão nas peças de concreto para pavimento;
- e. *Aparência* – relacionada com o aspecto estético das peças, não se observa nas normas internacionais nenhum tipo de controle no que diz respeito à aparência (uniformidade, textura, cor, etc).

- **Normas internacionais**

Na Europa, onde a utilização de blocos para pavimentação já é difundida amplamente, foi elaborada pela *European Committee for Standardization* (CEN) a norma BS EN - 1338 (2003): *Concrete paving blocks – Requirements and tests methods*, para a utilização de blocos em calçadas, áreas urbana das cidades, ciclovias, estacionamentos, estradas, rodovias, áreas industriais como portos e terminais de carga, aeroportos, baias de ônibus e postos de gasolina.

Esta norma dispõe sobre as definições gerais, requisitos de materiais e processo de fabricação de blocos de concreto intertravado, trata da avaliação da conformidade dos produtos fabricados e critérios de atendimento aos requisitos especificados. Possui oito anexos que descrevem os métodos de ensaio requeridos nos requisitos de produto, tais como absorção de água, resistência à tração por compressão, resistência à abrasão, resistência à frenagem/escorregamento entre outras especificações. A Tabela II.7 apresenta um resumo dos requisitos especificados na norma BS EN - 1338 (2003) para a conformidade dos blocos para pavimentação.

Tabela II.7 – Requisitos da norma BS EN - 1338 (2003)

Requisitos		Limites		
Resistência a ciclos de gelo-degelo		Média de 3 resultados $< 1,0 \text{ kg m}^{-2}$ e nenhum resultado individual $> 1,5 \text{ kg m}^{-2}$		
Absorção de água		$< 6,0\%$		
Resistência à compressão (adaptação método Lobo Carneiro)		Nenhum resultado individual $< 3,6 \text{ MPa}$ e a carga de ruptura $< 250 \text{ N mm}^{-1}$		
Resistência à abrasão (*disco de Bohme, DIN-52108)		* $\leq 20 \text{ cm}^3 \cdot 50 \text{ cm}^{-2}$		
(**disco de desgaste metálico, NF P 98-303)		** $\leq 23 \text{ mm}$		
Resistência frenagem/escorregamento (pêndulo Britânico)		$> 45$		
Aspectos visuais – textura/cor		Nenhum paver deve apresentar fissuras, quebras ou delaminação (no caso de paver de dupla camada)		
Tolerância dimensional (mm)	Altura da peça	Comprimento	Largura	Altura
	$< 100$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 3$
	$> 100$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 3$

Fonte: FIORITI (2007).

Na América do Norte devido à crescente utilização de blocos de concreto na pavimentação de ruas e calçadas, também foram elaboradas normas técnicas para regulamentar e padronizar a fabricação e controle de qualidade dos pavers. Nos Estados Unidos a norma vigente é a ASTM – C 936 (1996): *Standard specification for solid concrete interlocking paving units*, e no Canadá a norma vigente é CSA A231.2 – 95 (1995): *Precast concrete pavers*. De acordo com Cruz (2003) e Fioriti (2007), as características requeridas nas normas norte americanas são basicamente as mesmas requeridas na norma européia, porém sem existir um consenso nos métodos de ensaio.

Na Tabela II.8 estão dispostos resumidamente os principais requisitos de desempenho para blocos de concreto para pavimentação previstos nas normas americana e canadense.

Tabela II.8 – Requisitos das normas ASTM – C 936/1996 e CSA A231.2 – 95/1995.

	Requisitos	Limites	
		ASTM – C936	CSA A231.2 - 95
Dimensões das peças	Área do paver	$< 0,065 \text{ m}^2$	
	Relação comprimento/espessura	$\leq 4$	
Tolerância dimensional (mm)	Comprimento	$\pm 1,6$	-1,0/+2,0
	Largura	$\pm 1,6$	-1,0/+2,0
	Altura	$\pm 3,2$	$\pm 3,0$
Resistência à compressão (MPa)	Média	$\geq 55,0$	$\geq 50,0$
	Individual	$\geq 50,0$	$\geq 45,0$
	Corpo-de-Prova	Peça inteira	Cubo ou cilindro extraído da peça – relação ou diâmetro/altura = 1/1
Área considerada no ensaio de resistência à compressão		Área líquida (conforme ASTM C 140-02)	Área da seção de aplicação da carga
Absorção	Média	$\leq 5,0\%$	
	Individual	$\leq 7,0\%$	-
Resistência ciclos gelo-degelo		Perda de massa $< 1,0\%$ (após 50 ciclos)	Média de 3 amostras Após 25 ciclos $\leq 200 \text{ g m}^{-2}$ Após 50 ciclos $\leq 500 \text{ g m}^{-2}$
Resistência à abrasão (perda de volume)		$\leq 15 \text{ cm}^2 \cdot 50 \text{ cm}^{-2}$	-

Fonte: FIORITI (2007).

- **Normas brasileiras**

Atualmente, no Brasil, com referência aos pavimentos intertravados de concreto, estão em vigor duas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- ABNT NBR 15953 (2011): Pavimentos intertravados com peças de concreto. Essa norma estabelece as diretrizes para assentamento de pavers em camada granular além de diretrizes de execução de qualquer tipo de pavimento sujeitos ao tráfego de pedestres, de veículos dotados de pneumáticos e áreas de armazenamento de produtos, cujo revestimento seja de pavimento intertravado.
- ABNT NBR 9781 (2013): Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Essa norma cancela e substitui a anterior NBR 9780 (1987) e estabelece os requisitos e métodos de ensaio exigíveis para aceitação de peças de concreto para pavimentação intertravada sujeita ao tráfego

de pedestres, de veículos dotados de pneumáticos e áreas de armazenamento de produtos.

A norma ABNT NBR 9781 (2013) foi escrita a partir das exigências da norma europeia EN 1338 (*Concrete paving blocks. Requirements and test methods*) adaptada à realidade brasileira. Essa norma apresenta alterações no que diz respeito aos requisitos dimensionais das peças de concreto intertravado, presentes na norma anterior. Além de o comprimento nominal máximo ter passado de 400 mm para 250 mm, foi incluído o requisito de índice de forma (IF), que prevê que a relação entre o comprimento e a espessura da peça seja menor ou igual a quatro.

Outra novidade, foi a inclusão de dois novos métodos de ensaio: o de absorção de água, segundo o qual as peças devem apresentar absorção média menor ou igual a 6%, e o de resistência à abrasão, cujo resultado deve ser menor ou igual a 23 mm para tráfego leve, e menor ou igual a 20 mm em condições de tráfego sujeitos à abrasão intensa. Na antiga norma eram exigidos apenas os requisitos dimensionais e de resistência mecânica à compressão, que se mantiveram no novo texto. Os ensaios de resistência à compressão e absorção de água são obrigatórios, porém o ensaio de resistência à abrasão é facultativo.

De acordo com a norma supracitada, os blocos de concreto para pavimentação são definidos como peças pré-moldadas, de formato geométrico regular, com comprimento máximo de 250 mm, largura mínima de 100 mm e altura mínima de 60 mm.

Um resumo dos requisitos constantes na norma ABNT NBR 9781 (2013) são apresentados na Tabela II.9.

Tabela II.9 – Requisitos para a produção de blocos de concreto para pavimentação

<i>Requisitos Físicos</i>		<i>Limites</i>
<i>Tolerância Dimensional (mm)</i>	Comprimento (mm)	$\pm 3,0$
	Largura (mm)	$\pm 3,0$
	Altura (mm)	$\pm 5,0$
<i>Resistência característica à compressão (MPa)</i>	Tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais de linhas	$\geq 35,0$
	Veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	$\geq 50,0$
<i>Absorção de água (%)</i>		$\leq 6$
<i>Resistência à abrasão (mm)</i>	Tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais de linhas	$\leq 23$
	Veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	$\leq 20$

Fonte: ABNT NBR 9781 (2013) adaptado.

## 2.6 Incorporação/reaproveitamento de resíduos sólidos industriais na construção civil

De acordo com Kern (1999), uma das características da indústria da construção civil, é o fato de causar grande impacto ambiental, por gerar poluição considerável, ser o setor de maior consumo individual de recursos naturais e ser responsável por 20% a 50% do consumo dos recursos naturais extraídos.

Combinando as três principais características da indústria da construção: grande consumidora de recursos naturais, emprego de diversos materiais, papel social e econômico muito importante no cenário nacional, a alternativa de reaproveitamento de resíduos sólidos próprios ou provenientes de outras indústrias tem oportunizado o surgimento de um novo eixo de pesquisas no âmbito das Engenharias Sanitária, Ambiental e Civil (KERN, 1999).

Esse eixo de pesquisa centra-se no estudo da incorporação/reutilização de resíduos industriais na fabricação de artefatos utilizados na construção civil, com o intuito de diminuir a demanda de recursos naturais explorados por este setor, juntamente com a necessidade da diminuição do impacto ambiental negativo pela grande quantidade de resíduos gerada.

Dentro da construção civil, a reutilização dos resíduos sólidos pode ajudar a reduzir os custos e prejuízos ambientais relativos ao tratamento e/ou disposição final desses resíduos, e também na redução dos impactos ambientais decorrentes da extração de matéria-prima diretamente do ambiente. Assim, a indústria da construção civil pode ter um papel relevante como receptora de resíduos sólidos no tocante à sua disposição final (BENATTI, 2008).

Segundo Kern (1999), a reutilização de resíduos no desenvolvimento de novos materiais pode ser aliada à diminuição do impacto ambiental negativo, pois apresenta inúmeras vantagens, tais como:

- Redução do volume de extração de matérias-primas, preservando os recursos naturais limitados;
- Redução do consumo de energia, considerando que os resíduos frequentemente incorporam grandes quantidades de energia;
- Produção de materiais com melhores características técnicas, em algumas situações;
- Possibilidade da criação de produtos diferenciados pelo “selo verde”;
- Redução do volume de aterros, que necessitam de espaços cada vez mais valorizados, especialmente próximos aos grandes centros urbanos.

Além das questões ambientais, a reutilização de resíduos na construção civil pode proporcionar, do ponto de vista econômico das empresas geradoras, uma redução das despesas de deposição de resíduos em aterros, e pode transformar uma fonte de despesa em uma fonte de receita, quando o resíduo tornar-se um subproduto e passar a ser comercializado. Pode também propiciar parcerias entre as indústrias geradoras e consumidoras de resíduos, viabilizando a implantação da ecologia industrial bem como a redução de preço do produto final.

Devido aos inúmeros benefícios que a reutilização de resíduos industriais tem apresentado, um número crescente de publicações tem abordado o estudo da utilização desses resíduos na produção de artefatos destinados à construção civil. Nesses estudos destaca-se a aplicação de resíduos industriais na produção de concreto, argamassas, blocos e tijolos cerâmicos e cimentícios, telhas, lajotas para piso e forro, bloquetes para piso e tubos cerâmicos (BENATTI, 2008).

Os trabalhos estão focados nos mais diversos resíduos de interesse, como o lodo de estações de tratamento de água e efluentes, cinzas provenientes de diversos processos

industriais, areias de fundição, refugos de mineração e metalurgia, escórias de fornos, resíduos de serragem de granito, resíduos de pneus, entre outros, os quais podem ser incorporados por meio de adições ou em substituição parcial de agregados ou do aglomerante nas argamassas.

No entanto, segundo Benatti (2008) é de extrema importância considerar na avaliação do produto final, além de suas características mecânicas e físicas, suas características químicas, como lixiviação e solubilização de contaminantes, para a avaliação do risco de contaminação sanitária e ambiental, que pode acarretar em riscos à saúde dos usuários do novo material e dos próprios trabalhadores da indústria recicladora. Portanto, antes de se colocar um novo material no mercado é necessário anos de pesquisa para assegurar que um produto tecnicamente seguro tenha sido desenvolvido.

Alguns pesquisadores, tais como, Ahmadi e Al-Khaja (2001), Shinzato e Hypolito (2005), Lam (2007), Ismail e Al-Hashmi (2009), Gailius (2010), Chidiac e Mihaljevic (2011), Cheah e Ramli (2011), Siddique e Singh (2011), Senthamarai (2011), Agredo (2012), Medina (2010), Singh e Siddique (2012), Kaur (2013), Lee *et al.*, (2013) e Tuan *et al.*, (2013) estudaram a incorporação de vários tipos de resíduos industriais (lodo da indústria de papel, resíduo da reciclagem de alumínio, pó de vidro, cinzas de resíduos de madeira, areia residual de fundição, resíduos da indústria cerâmica, resíduos petroquímicos e lodo de esgoto industrial) em matrizes de cimento, bem como pesquisadores brasileiros como Pablos (2008), Granzotto (2010) e Souto (2010).

Asavapisit e Chotklang (2004), Asavapisit e Cosanavit (2004), Chen *et al.*, (2011) investigaram, mais especificamente, a incorporação de lodo galvânico em pastas cimentícias.

Devido à grande aceitação da utilização dos blocos intertravados na pavimentação de ruas e calçadas, seus benefícios econômicos, estéticos e principalmente ambientais, pois permite incorporação de resíduos em sua fabricação, uma gama de pesquisas foi e vem sendo desenvolvidas com o intuito de estudar e aprimorar a incorporação de diversos tipos de resíduos na fabricação de pavers.

No últimos anos, tais estudos foram realizados por Watanabe (2004), Pagnussat (2004), Fioriti (2007), Hago *et al.*(2007), Franco (2011), Gencel *et al.* (2012), Uygunoglu *et al.* (2012) e Altoé (2013).

A utilização de areia de fundição residual como agregado na confecção de pavimentos de concreto foi estudado por Watanabe (2004). A adição do resíduo com granulometria inferior ao do agregado provocou um aumento da resistência mecânica das peças devido ao melhor empacotamento das partículas. Ensaios de lixiviação mostraram que a areia de fundição não influenciou negativamente na concentração dos elementos químicos analisados e a possibilidade de substituição de 25% da areia comum por areia de fundição residual foi verificada.

Pagnussat (2004) estudou a utilização de escórias granuladas de fundição (EGF), em substituição parcial (10, 30 e 50%) ao cimento e ao agregado miúdo do concreto de pavers. Os pavimentos fabricados com EGF aos 28 dias de hidratação apresentaram características físicas (absorção de água) e mecânicas (compressão e abrasão) próximas às apresentadas pelos blocos referência, sendo que o corpo-de-prova com 50% de EGF apresentou valores de resistência superiores àqueles obtidos para as demais substituições, no entanto, menores do que as dos blocos referência. A partir desses resultados, o autor considera a EGF como um potencial subproduto passível de utilização como insumo para a construção civil.

Resíduos de pneus como substituto parcial do agregado, na fabricação de blocos de concreto para pavimentação foi avaliado por Fioriti (2007). Níveis de incorporação de 8%, 10%, 12%, 15% e 20% , em volume foram estudados. Os resultados obtidos mostraram que a utilização do resíduo provocou uma queda na resistência das peças fabricadas, em contrapartida acarretou em um aumento da capacidade de absorção de energia (tenacidade) das mesmas. A resistência à abrasão mostrou-se interessante para a aplicação dos blocos em ambientes com solicitações leves de carga. Os percentuais que mostraram viabilidade de utilização de resíduos de pneu na pavimentação intertravada foram de 8% a 12% em volume.

Franco (2011) avaliou a incorporação de resíduos sólidos galvânicos (poeira de jateamento e lodo) na produção de blocos de concreto para pavimentação em substituição ao cimento (5% a 25%). As peças com incorporação de 5% de ambos os resíduos apresentaram os melhores resultados com relação às propriedades mecânicas e físicas. O processo de estabilização/solidificação dos contaminantes em matriz cimentícia também se mostrou promissor devido às baixas concentrações de metais detectados nos lixiviados e solubilizados das amostras retiradas dos blocos. No geral, os

resultados revelaram uma promissora aplicabilidade desses resíduos na fabricação de pavimentos.

A proposta de utilização de resíduos da indústria do mármore na fabricação de blocos de concreto, como substituto parcial dos agregados (10%, 20%, 30% e 40%) foi estudada por Gencel *et al.*, (2012). Verificou-se uma diminuição da resistência à compressão das peças com o aumento do teor de mármore adicionado ao concreto, porém, os valores de resistência à compressão obtidas aos 28 dias de cura foram satisfatórios. O resíduo favoreceu o aumento da resistência ao desgaste por abrasão dos blocos, bem como acarretou em um aumento na quantidade de água requerida para a fabricação do concreto. No geral, os pesquisadores concluíram que a incorporação desse resíduo industrial fornece blocos para pavimentação de qualidade.

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) e o resíduo de pneus inservíveis também foram utilizados como substitutos do agregado miúdo do concreto na confecção de blocos intertravados, no estudo realizado por Altoé (2013). O estudo revelou a viabilidade da utilização de CBC uma vez que o resíduo ajudou na melhoria das características mecânicas e físicas das peças fabricadas, devido ao efeito filler da CBC nos concretos, sendo obtidos melhores resultados quando se utilizou 25% de CBC em substituição ao agregado miúdo. Já os resíduos de pneus não apresentaram resultados que justificassem sua utilização, porém em utilização composta, ou seja, resíduos de pneus + CBC, os blocos apresentaram características satisfatórias para a execução de pavimentos sujeitos a solicitações leves de tráfego.

Os dados levantados nessa pesquisa bibliográfica mostram o potencial do processo de estabilização/solidificação no tratamento e aproveitamento de resíduos sólidos industriais, o que justifica a continuidade dos trabalhos, com o intuito de expandir as possibilidades de utilização, bem como para a melhor compreensão dos mecanismos envolvidos no processo, o que levará à otimização das suas condições operacionais.

## CAPÍTULO III

### 3 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS GALVÂNICOS

Com o intuito de atingir os objetivos propostos no presente trabalho, foi desenvolvido um programa experimental que fornecesse subsídios necessários ao entendimento sobre as características dos resíduos galvânicos utilizados, bem como a avaliação do desempenho dos blocos de concreto fabricados com os mesmos.

A primeira parte do programa experimental compreendeu a caracterização dos resíduos sólidos galvânicos, com o intuito de verificar suas características físicas, químicas e microestruturais e sua potencial utilização como substituto parcial do agregado miúdo na fabricação do pavimento de concreto.

Os materiais e métodos utilizados, os resultados obtidos e as conclusões referentes à caracterização dos resíduos serão apresentados a seguir.

#### 3.1 Metodologia

##### 3.1.2 Coleta, preparo e acondicionamento

Os resíduos utilizados para a fabricação dos blocos de concreto foram coletados diretamente de duas indústrias galvânicas geradoras. A poeira de jateamento foi proveniente das câmaras de jateamento de peças de uma indústria de resistências elétricas localizada na região de Peabiru – PR e o lodo galvanotécnico foi coletado da estação de tratamento de efluentes de uma indústria de peças de aço inox localizada na região de Maringá – PR.

Após a coleta, devido ao excesso de umidade, o lodo galvânico foi submetido a secagem, trituração e peneiramento. Posteriormente ambos resíduos foram acondicionados em recipientes plásticos (que possuíam tampas com lacre), conforme Figura III.1 e armazenados em local protegido.



Figura III.1 – Recipientes para acondicionamento dos resíduos

### 3.1.3 Caracterização físico-química e microestrutural

Para a caracterização, os resíduos foram pesados e submetidos à secagem em estufa a 110°C por 24 horas, ou até obtenção de massa constante. Em seguida, foram peneirados (quando necessário), para garantir a homogeneidade das amostras. A Figura III.2 apresenta o aspecto dos resíduos após a secagem.

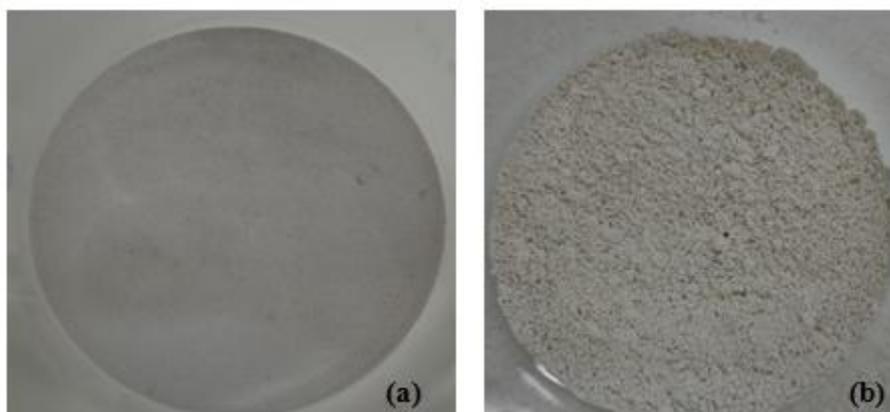


Figura III.2 – (a) Poeira de jateamento e (b) lodo de galvanoplastia

#### 3.1.3.1 Caracterização Física

A caracterização física dos resíduos foi realizada por meio das análises de granulometria integrada e massa específica.

A análise de granulometria integrada permite a integração de dois métodos de ensaios granulométricos, o ensaio granulométrico via úmida, que consiste na determinação da distribuição de tamanho do material por peneiras, entre as malhas mesh

8 até 325, e o ensaio granulométrico via laser, que permite a determinação da distribuição granulométrica do material analisado com granulometria variando de 0,04 e 500 microns.

Para análise granulométrica integrada feita nos resíduos galvânicos, foram utilizadas peneiras BERTEL entre as malhas *mesh* 8 e 80 e granulômetro a laser Cilas 1064 entre 0,04 e 500  $\mu\text{m}$ . Os ensaios foram realizados no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR) do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná.

Os ensaios para determinação da massa específica dos materiais seguiram a metodologia descrita na norma Mercosul NM 23 (2000) – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Construção Civil (P02) da Universidade Estadual de Maringá.

### 3.1.3.2 Caracterização Química

A caracterização química dos resíduos estudados foi realizada por meio de ensaios de lixiviação, solubilização, medida de pH, determinação da concentração de metais e determinação da atividade pozolânica.

Os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados segundo a norma ABNT NBR 10005 (2004) (que segue o método 1311 USEPA SW-846) e a norma ABNT NBR 10006 (2004), respectivamente.

Tanto o extrato lixiviado como o extrato solubilizado, foram submetidos à determinação dos teores de alguns contaminantes listados nos anexos F e G da norma ABNT NBR 10004 (2004), por meio de Espectrômetro de Absorção Atômica Varian - SPECTRAA-240FS e Cromatógrafo de íons, Metrohm – 850 Professional IC. Todas as leituras foram feitas em duplicata. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental (LGCPA) do Departamento de Engenharia Química e no Complexo Central de Apoio à Pesquisa (COMCAP), ambos localizados na Universidade Estadual de Maringá.

A Tabela III.1 apresenta as condições de ajuste do espectrômetro de absorção atômica para a leitura das amostras.

Tabela III.1 – Condições de ajuste do espectrômetro de absorção atômica

<i>Metal</i>	<i>Chama</i>	<i>Comprimento de onda (nm)</i>	<i>Largura (nm)</i>	<i>Faixa ótima de trabalho (ppm)</i>	<i>Limite de detecção (ppm)</i>
<i>Ag</i>	Ac-Ar <sup>1</sup>	328,1	0,5	0,02 - 10	0,02
<i>Cd</i>	Ac-Ar	228,8	0,5	0,02 - 3	0,02
<i>Cr</i>	Ac-Ar	357,9	0,2	0,06 - 15	0,06
<i>Pb</i>	Ac-Ar	217,0	1,0	0,1 - 30	0,10
<i>Ba</i>	Ac-ON <sup>2</sup>	553,6	0,5	2 - 50	2,00
<i>As</i>	Ac-ON	193,7	0,5	3 - 150	3,00
<i>Hg</i>	GH <sup>3</sup>	253,7	0,5	0,10 - 400	0,10
<i>Se</i>	Ac-ON	196,0	1,0	5 - 250	5,00
<i>Cu</i>	Ac-Ar	324,8	0,5	0,03 - 10	0,03
<i>Fe</i>	Ac-Ar	248,3	0,2	0,06 - 15	0,06
<i>Mn</i>	Ac-Ar	279,5	0,2	0,02 - 5	0,02
<i>Na</i>	Ac-Ar	330,2	0,5	2 - 400	2,00
<i>Al</i>	Ac-ON	309,3	0,5	0,3 - 250	0,30

<sup>1</sup>Acetileno-Ar; <sup>2</sup>Acetileno-Óxido Nitroso; <sup>3</sup>Gerador de Hidretos

O pH das amostras de resíduos foi determinado conforme recomendado pela norma ABNT NBR 10005 (2004) utilizando-se equipamento pHgmetro digital DIGIMED®.

A determinação da concentração de metais foi realizada após digestão ácida das amostras na presença de ácido fluorídrico (HF) em equipamento micro-ondas, segundo a metodologia EPA 3052 (1996) (digestão ácida de matrizes contendo silicatos), feita no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR). A leitura da concentração dos metais foi feita em Espectrômetro de Absorção Atômica Varian - SPECTRAA-240FS (com chama) e foi realizada na COMCAP/UEM nas mesmas condições de ajuste apresentadas na Tabela III.1. Os metais analisados foram alumínio (Al), bário (Ba), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu), cromo (Cr), ferro (Fe), manganês (Mn), mercúrio (Hg), prata (Ag) e sódio (Na).

A determinação da atividade pozolânica das amostras de poeira de jateamento e do lodo de galvanoplastia foi realizada de acordo com as normas ABNT NBR 5751

(2012) – *Determinação da atividade pozolânica com cal/Índice de atividade pozolânica com cal* e ABNT NBR 5752 (1992) – *Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland/Índice de atividade pozolânica com cimento*, no Laboratório de Construção Civil da UEM.

### 3.1.3.3 Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural foi realizada por meio dos ensaios de difração de raios-x (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e fluorescência de raios-x (FRX).

Para a difração das amostras de resíduos foi utilizado o equipamento modelo Bruker-AXS, D8 Advance (radiação Cu  $\alpha$ , corrente de 35 mA e voltagem de 40 kV, com ângulo de difração  $2\theta$  entre  $10^\circ$  a  $100^\circ$ , na velocidade de  $0,004^\circ\text{s}^{-1}$ , alocado na COMCAP/UEM.

A preparação das amostras e a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos resíduos também foram realizadas na COMCAP/UEM, por meio de microscópio eletrônico de varredura de elétrons Superscan SS - 550 da marca Shimadzu, operando com tensão de aceleração de 10 kV, com capacidade de aumento de 60 a 6.000 vezes;

A análise de fluorescência de raios-x (FRX) foi realizada em um espectrômetro de raios-x Rigaku, modelo ZSX Mini II, (radiação Pd  $K\alpha$ , corrente de 1,2 mA, voltagem de 40 kV), no Laboratório de Raios-x do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC).

## 3.2 Resultados e Discussão da caracterização dos resíduos

A seguir serão apresentados os resultados da caracterização física, química e microestrutural dos resíduos galvanotécnicos: poeira de jateamento e lodo galvânico. Os resultados que serão apresentados, tem o intuito de fornecer dados para o conhecimento das características dos resíduos a fim de viabilizar o seu uso como matéria-prima na produção de blocos de concreto para pavimentação.

### 3.2.1 Granulometria a laser, massa específica e pH

Os resultados da granulometria a laser da poeira de jateamento e lodo de galvanoplastia, juntamente com suas curvas granulométricas estão apresentados na Tabela III.2, Tabela III.3, Figura III.3 e Figura III.4, respectivamente.

Tabela III.2 – Análise granulométrica da poeira de jateamento

<i>Malhas (Tyler)</i>	<i>Abertura de Peneiras (mm)</i>	<i>Retido (%)</i>	<i>Retido acumulado acima (%)</i>	<i>Retido acumulado abaixo (%)</i>
35	0,425	0,00	0,00	100,0
42	0,355	0,00	0,00	100,0
48	0,280	0,00	0,00	100,0
80	0,180	0,00	0,00	100,0
100	0,150	0,00	0,00	100,0
170	0,090	4,19	4,19	95,81
200	0,075	6,51	10,70	89,30
250	0,063	9,90	20,60	79,40
270	0,053	11,41	32,01	67,99
325	0,043	12,08	44,09	55,91
400	0,036	8,11	52,20	47,80
500	0,028	9,73	61,93	38,07
635	0,020	11,15	73,08	26,92
	0,010	13,27	86,35	13,65
	0,006	4,52	90,87	9,13
	0,003	3,75	94,62	5,38
	0,001	4,26	98,88	1,12
	<i>Menor 0,001</i>	1,12	100,0	0,00

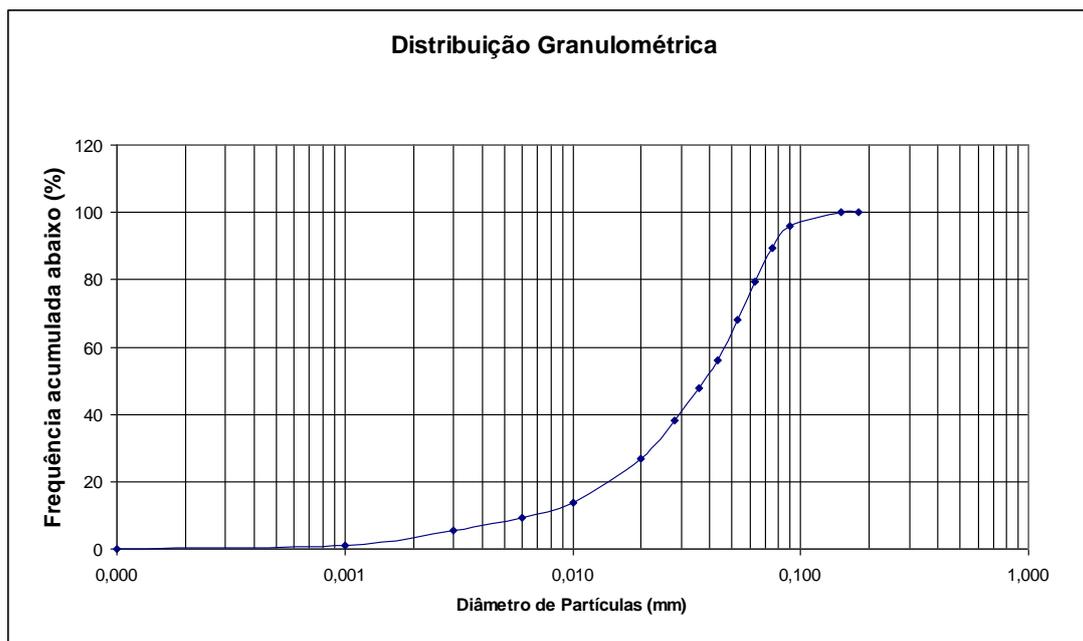


Figura III.3 – Distribuição granulométrica da poeira de jateamento

A Tabela III.2 e a Figura III.3 permitem observar que a composição granulométrica da poeira de jateamento encontrou-se entre as faixas granulométricas de 0,001 a 0,09 mm, com um diâmetro médio de partícula em torno de 0,0038 mm ou 3,8  $\mu\text{m}$ . Esse resíduo pode ser considerado muito fino, pois cerca de 90% de suas partículas encontram-se abaixo do diâmetro de partícula de 0,075 mm, como observado por Ortigão (2007).

A poeira de jateamento também pode ser classificada, de acordo com a International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE), na faixa granulométrica entre a areia fina (0,06 a 0,2 mm) e a argila (< 0,002 mm), essa faixa granulométrica é a do silte que varia de 0,002 mm a 0,06 mm.

Para o lodo galvânico, a análise granulométrica permitiu classificar suas partículas em tamanhos que variam de 0,0001 mm a 0,053 mm, com um diâmetro médio de 0,0092 mm ou 9,2  $\mu\text{m}$ . O lodo de galvanoplastia também pode ser considerado muito fino com cerca de 100% de suas partículas encontrando-se abaixo de 0,075 mm. Sua classificação, de acordo com o ISSMFE, fica entre a argila (com 12,38% das partículas com diâmetro menor que 0,002 mm) e o silte.

Tabela III.3 – Análise granulométrica do lodo de galvanoplastia

Malhas (Tyler)	Abertura de Peneiras (mm)	Retido (%)	Retido acumulado acima (%)	Retido acumulado abaixo (%)
35	0,425	0,00	0,00	100,0
42	0,355	0,00	0,00	100,0
48	0,280	0,00	0,00	100,0
80	0,180	0,00	0,00	100,0
100	0,150	0,00	0,00	100,0
170	0,090	0,00	0,00	100,0
200	0,075	0,00	0,00	100,0
250	0,063	0,00	0,00	100,0
270	0,053	0,06	0,06	99,94
325	0,043	1,01	1,07	98,93
400	0,036	2,56	3,63	96,37
500	0,028	6,42	10,05	89,95
635	0,020	10,79	20,84	79,16
	0,010	24,95	45,79	54,21
	0,006	17,91	63,70	36,30
	0,003	18,13	81,83	18,17
	0,001	11,76	93,59	6,41
	Menor 0,001	6,41	100,0	0,00

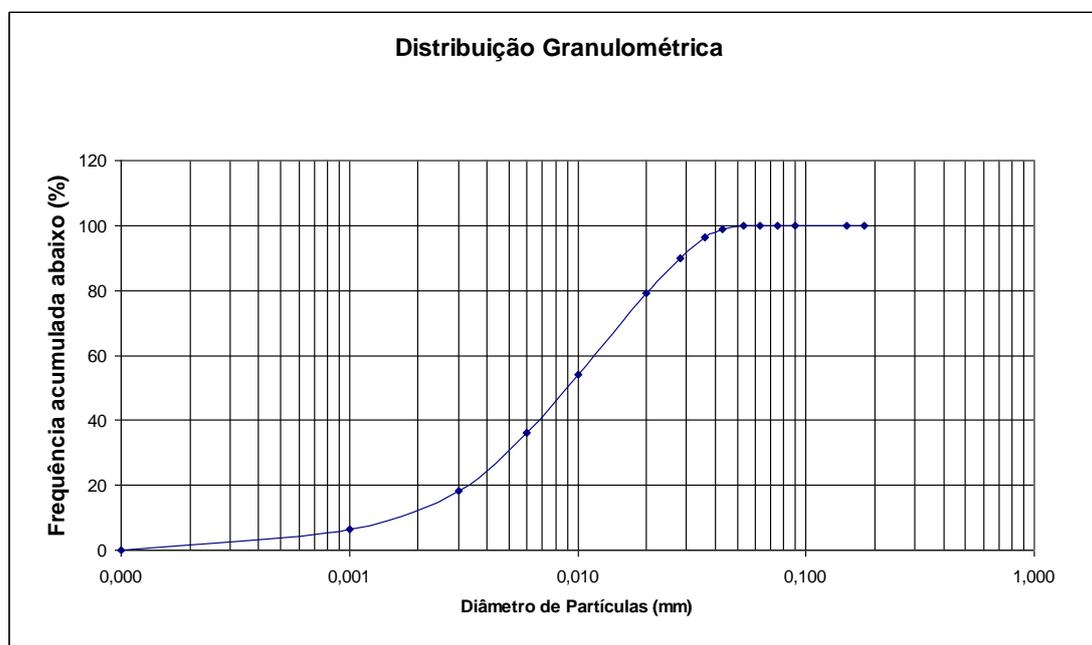


Figura III.4 – Distribuição granulométrica do lodo de galvanoplastia

Tanto a poeira de jateamento quanto o lodo galvânico possuem diâmetros de partícula dentro das faixas granulométricas da cinza volante (partículas < 0,001 mm até 0,1 mm), escória de alto-forno (partículas < 0,045 mm) e cinza de casca de arroz

(diâmetro médio de partícula 0,012 mm). Esses materiais são subprodutos industriais comumente utilizados como aditivos minerais (pozolanas) na fabricação do concreto de cimento, pois, além da matriz silicosa, a finura desses materiais favorece o aumento da resistência final, impermeabilidade e durabilidade do concreto, como observado por Mehta e Monteiro (2008).

Portanto, ambos os resíduos galvânicos estudados apresentam distribuições granulométricas adequadas para utilização na fabricação de concretos. A quantidade de finos presentes nos resíduos pode aumentar a durabilidade dos blocos de concreto produzidos, proporcionando melhor arranjo (empacotamento) entre as partículas do agregado, devido ao preenchimento dos vazios deixados pelos agregados de maior granulometria.

Os valores de pH e massa específica dos resíduos utilizados no presente trabalho são apresentados na Tabela III.4.

O conhecimento dos valores de pH dos resíduos é necessário, pois, o pH influencia diretamente na lixiviação e solubilização de compostos contaminantes presentes nos mesmos. Já o conhecimento dos valores da massa específica é de extrema importância para efeito de dosagem dos materiais na fabricação do concreto, pois é necessário que se conheça o espaço ocupado pelas partículas (incluindo os poros) de resíduo por unidade de volume.

Tabela III.4 – Características dos resíduos estudados

<i>Resíduos</i>	<i>pH</i>	<i>Massa específica (g cm<sup>-3</sup>)</i>
<i>Poeira de jateamento</i>	8,1	2,61
<i>Lodo galvânico</i>	9,2	1,65

Os resíduos apresentaram valores de pH básico. A poeira de jateamento apresentou uma massa específica muito próxima do valor obtido para a areia (2,66g cm<sup>-3</sup>) utilizada no presente trabalho.

### 3.2.2 Fluorescência de raios-x (FRX)

A Tabela III.5 apresenta os resultados da análise de fluorescência de raios-x da poeira de jateamento e lodo galvânico. A fluorescência de raios-x é importante pois, permite avaliar qualitativamente os minerais presentes nos resíduos.

No que diz respeito à poeira de jateamento, destacou-se a porcentagem de  $\text{SiO}_2$  (67,86%) em sua composição. Esse resultado já era esperado, pois a poeira de jateamento é um resíduo proveniente do pré-tratamento mecânico das peças, que é feito por meio do jateamento das mesmas com microesferas de vidro. Constatou-se ainda quantidades expressivas de  $\text{CaO}$  (16,11%), de  $\text{MgO}$  (6,68%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (4,26%), além de  $\text{K}_2\text{O}$  (1,43%) e de outros compostos em quantidades menores que 1%.

Os álcalis, de acordo com as observações de Mehta e Monteiro (2008), em certas quantidades, podem provocar a deterioração do concreto por meio de reações expansivas (reações álcali-agregado), culminando em deformações, deslocamento da estrutura, fissuração, lascamento e pipocamento do concreto.

Tabela III.5 – Fluorescência de raios-x: porcentagem em massa dos compostos na composição dos resíduos

<i>Compostos</i>	<i>Poeira de jateamento (% massa)</i>	<i>Lodo de galvanoplastia (% massa)</i>
<i>MgO</i>	6,68	n.d
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	1,15	0,26
<i>SiO<sub>2</sub></i>	67,86	4,35
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	0,33	45,81
<i>K<sub>2</sub>O</i>	1,43	0,03
<i>CaO</i>	16,11	0,44
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	1,03	39,29
<i>ZnO</i>	0,17	9,38
<i>SO<sub>3</sub></i>	0,28	0,08
<i>Cl</i>	0,05	0,36
<i>SrO</i>	0,03	n.d
<i>CuO</i>	0,57	n.d
<i>CdO</i>	0,06	n.d
<i>Na<sub>2</sub>O</i>	4,26	n.d

n.d – não detectado pelo equipamento

No caso do lodo galvanotécnico pode-se observar altos teores de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (45,81%) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (39,29%) em sua composição. A presença de pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) no lodo, pode ser atribuída à sua utilização como agente de limpeza das peças de galvanoplastia após os tratamentos químicos. O óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) detectado, muito provavelmente, é proveniente da composição das peças galvanizadas, bem como o óxido de zinco ( $\text{ZnO}$ ).

Além de avaliar quantitativamente os compostos presentes nos resíduos, a fluorescência de raios-x também pode ajudar na classificação dos materiais de acordo com seu grau de pozolanicidade, segundo a norma ABNT NBR 12653 (1992).

A poeira de jateamento encontra-se em conformidade com as exigências químicas prescritas pela norma supracitada, para sua classificação como material pozolânico Classe N, apresentando somatória de óxidos ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) em torno de 70% e porcentagem de anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ) de 0,28%. A referida norma também limita a quantidade de equivalentes de  $\text{Na}_2\text{O}$  ( $\text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$ ) nos materiais pozolânicos em 1,5%. A poeira de jateamento apresentou quantidade de álcalis disponíveis de 5,20%, indicando seu uso moderado em substituição ao cimento para evitar malefícios à estrutura do concreto.

Já o lodo galvânico apresentou somatória de óxidos igual a 44,0%, não se encaixando, portanto, em nenhuma das classes prescritas pela norma de materiais pozolânicos. Porém, o valor obtido para o lodo aproximou-se muito da porcentagem mínima requerida pela norma para pozolanas de Classe E (pozolanas de materiais não-tradicionais) que é de 50%. As porcentagens de  $\text{SO}_3$  e equivalentes de  $\text{Na}_2\text{O}$  foram, respectivamente, 0,08% e 0,02%, ou seja, dentro dos padrões exigidos.

### 3.2.3 Atividade pozolânica

Os resultados das análises de pozolanicidade dos resíduos galvânicos estão apresentados na Tabela III.6. É possível observar que a poeira de jateamento apresentou índice de atividade pozolânica com cimento de 85,90%, superior ao valor mínimo exigido pela norma ABNT NBR 12653 (1992), que é de 75%. Já o lodo galvânico apresentou um valor de atividade pozolânica inferior ao estabelecido pela norma, de 36,05%. Esse resultado favorável para a poeira de jateamento pode estar relacionado ao alto teor de sílica presente em sua composição química, aliada a sua granulometria fina. O resultado obtido para poeira de jateamento foi semelhante ao índice de atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana calcinada estudada por Barroso (2011).

Tabela III.6 – Resultados dos índices de atividade pozolânica dos resíduos galvânico

<i>Índice de atividade pozolânica</i>	<i>Exigência NBR*</i>	<i>Poeira de jateamento</i>	<i>Lodo galvânico</i>
Com cimento, % mín aos 28 dias	75	85,90	36,05
Com cal aos 7 dias, em MPa	6,0	1,69	0,07

\*Valores exigidos pela ABNT NBR 12653 (1992) para classes de materiais pozolânicos N, C e E.

No que diz respeito ao índice de atividade pozolânica com a cal, nenhum dos resíduos estudados apresentou resistência suficiente aos 7 dias de cura para garantir

pozolanicidade. Esses resultados são conflitantes principalmente com os obtidos para a poeira de jateamento que apresentou alta atividade pozolânica com o cimento. De acordo com Weber (2001) apud Pouey (2006), a variação na qualidade da cal utilizada na realização do ensaio pode refletir diretamente nos resultados obtidos, acarretando em valores errôneos de pozolanicidade.

Além da atividade pozolânica com cal e cimento, de acordo com a norma ABNT NBR 12653 (1992), outras análises químicas e físicas são necessárias para a classificação dos resíduos nas classes de materiais pozolânicos. A Tabela III.7 apresenta um resumo das condições exigidas para materiais pozolânicos, bem como os resultados obtidos para a poeira de jateamento e lodo.

Tabela III.7 – Condições exigíveis para materiais pozolânicos segundo ABNT NBR 12653 (1992)

<i>Propriedades</i>	<i>Exigências Químicas</i>				
	<i>Classe de material pozolânico</i>			<i>Resíduos</i>	
	<i>N</i>	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>Poeira jateamento</i>	<i>Lodo galvânico</i>
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % mín	70,00	70,00	50,00	70,00	44,00
SO <sub>3</sub> , % máx	4,00	5,00	5,00	0,28	0,08
Teor de umidade, % máx	3,00	3,00	3,00	n.d	n.d
Perda ao fogo, % máx	10,00	6,00	6,00	n.d	n.d
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O, % máx	1,50	1,50	1,50	5,20	0,02
	<i>Exigências Físicas</i>				
Material retido na peneira 45µm, % máx	34,00	34,00	34,00	44,00	1,07
Índice de atividade pozolânica com cimento, % mín aos 28 dias	75,00	75,00	75,00	85,90	36,05
Índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias, em MPa	6,00	6,00	6,00	1,69	0,07
Água requerida, % máx	115,00	110,00	110,00	84,50	64,70

n.d: não determinado

Pela Tabela III.7 observa-se que nenhum dos resíduos galvânico se enquadra em nenhuma classe de materiais pozolânicos, pois de acordo com a referida norma, o não atendimento de qualquer um dos requisitos solicitados implica na não classificação do material como pozolana. A poeira de jateamento atingiu as condições exigidas com relação à porcentagem de óxidos (SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), % SO<sub>3</sub>, atividade pozolânica com o cimento e água requerida. O lodo de galvanoplastia atingiu os requisitos de % SO<sub>3</sub>, álcalis disponíveis, material retido na peneira 45µm e água requerida.

A não classificação dos resíduos como pozolanas não exclui a hipótese de ocorrência de reações pozolânicas da poeira de jateamento na pasta de concreto devido a sua comprovada atividade pozolânica, bem como a melhoria das características de durabilidade do concreto devido á finura apresentada pelos resíduos.

### 3.2.4 Difração de raios-x (DRX)

A Figura III.5 e Figura III.6 apresentam os difratogramas obtidos por meio da análise de difração de raios-x nas amostras da poeira de jateamento e lodo galvânico, respectivamente.

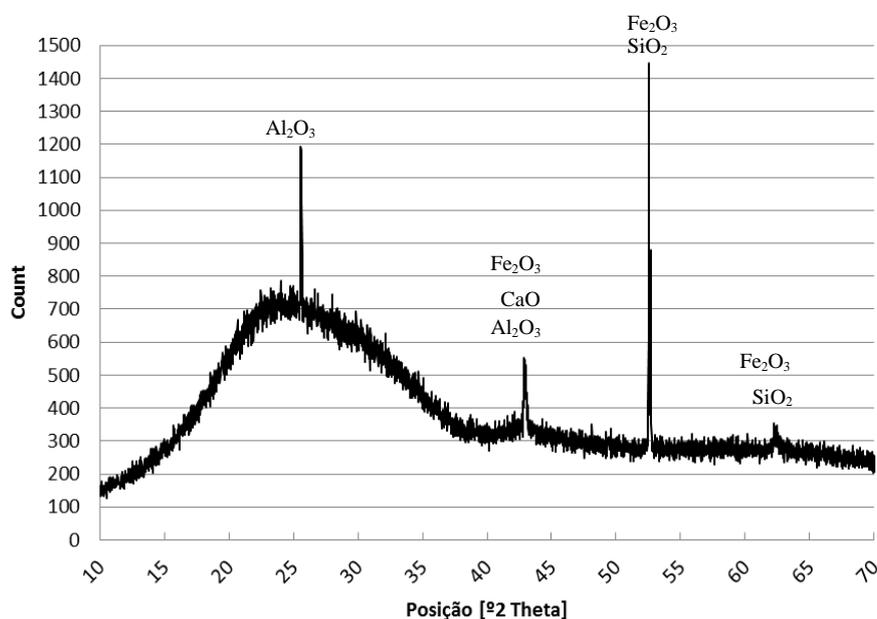


Figura III.5 – Difratograma da poeira de jateamento

O difratograma da poeira de jateamento indica estrutura amorfa característica de vidro silicatos como descrito por Shi e Zheng (2007), que pode ser evidenciado pela formação da curva na posição  $2\theta$  entre  $15^\circ - 38^\circ$ , e pela altura da linha da base de fundo em relação ao ponto zero. De acordo com Rocha (2005), quanto menor a incidência de picos bem definidos no gráfico resultante do ensaio de difração de raios-x (apresentando uma curva suave, porém cheia de ruídos), maior é o grau de vitrificação da substância, ou seja, há menor presença de planos cristalinos bem definidos (menor cristalinidade) e consequentemente maior reatividade.

Além disso, segundo Montanheiro *et al.*, (2003), a banda amorfa presente no difratograma (região  $2\theta$  entre  $18^\circ - 32^\circ$ ) também é característica de substâncias com

atividade pozolânica. Os picos formados sobre a curva amorfa indicam a presença de estruturas cristalinas como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$  na amostra do resíduo.

O difratograma do lodo galvânico (Figura III.6) mostrou-se típico de substância amorfa, com curva suave registrada na posição  $2\theta$  entre  $25^\circ$  -  $35^\circ$  e grande altura da linha da base de fundo, em relação a origem. Para o lodo galvânico não foi possível detectar nenhum pico de estrutura cristalina, devido muito provavelmente à grande quantidade e variedade de substâncias presentes no lodo, provenientes dos processos de pré-tratamento, tratamento químico e pós-tratamento das peças galvanizadas.

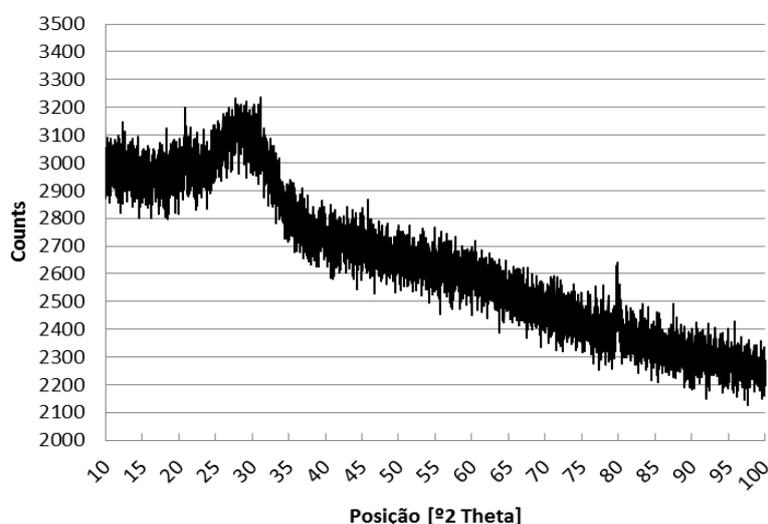


Figura III.6 – Difratograma do lodo de galvanoplastia

### 3.2.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura III.7 apresenta as micrografias da poeira de jateamento obtidas por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura. As micrografias foram feitas com diferentes ampliações para melhor visualização da morfologia das partículas dos resíduos.

É possível observar nas Figuras III.7 (a) e (b) que esse resíduo possui um aspecto heterogêneo, no que diz respeito à morfologia das partículas, que são compostas por microesferas de vidro e pedaços de partículas (microesferas e sujidades), provenientes do choque do material abrasivo com as peças a serem galvanizadas na etapa do pré-tratamento mecânico do processo. Com o aumento da ampliação, é

possível observar nas Figuras III.7 (c) e (d), cacos de microesferas de vidro e também o resultado dos impactos na superfície das mesmas, além de impurezas e sujidades.

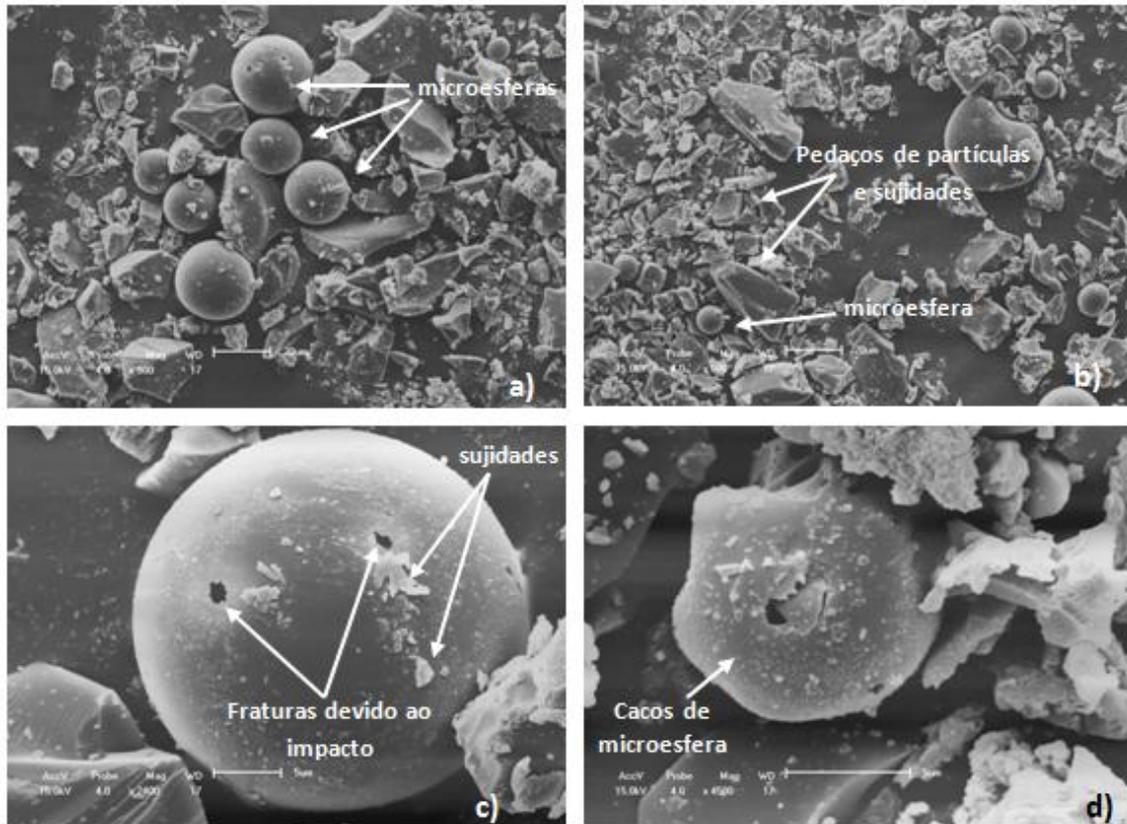


Figura III.7 – Microscopia eletrônica de varredura de amostras de poeira de jateamento: (a) e (b) ampliação 500 vezes, 20  $\mu\text{m}$  (c) ampliação 2400 vezes, 5  $\mu\text{m}$  (d) ampliação 4500 vezes, 5  $\mu\text{m}$

A Figura III.8 apresenta os resultados da microscopia eletrônica de varredura de uma amostra de lodo galvânico. É possível observar nas figuras que o lodo galvânico apresentou um aspecto mais homogêneo, se comparado com a micrografia da poeira de jateamento. De modo geral, podem-se observar partículas de lodo com morfologias esféricas e ovais ligadas entre si por poros de diferentes tamanhos e formas.

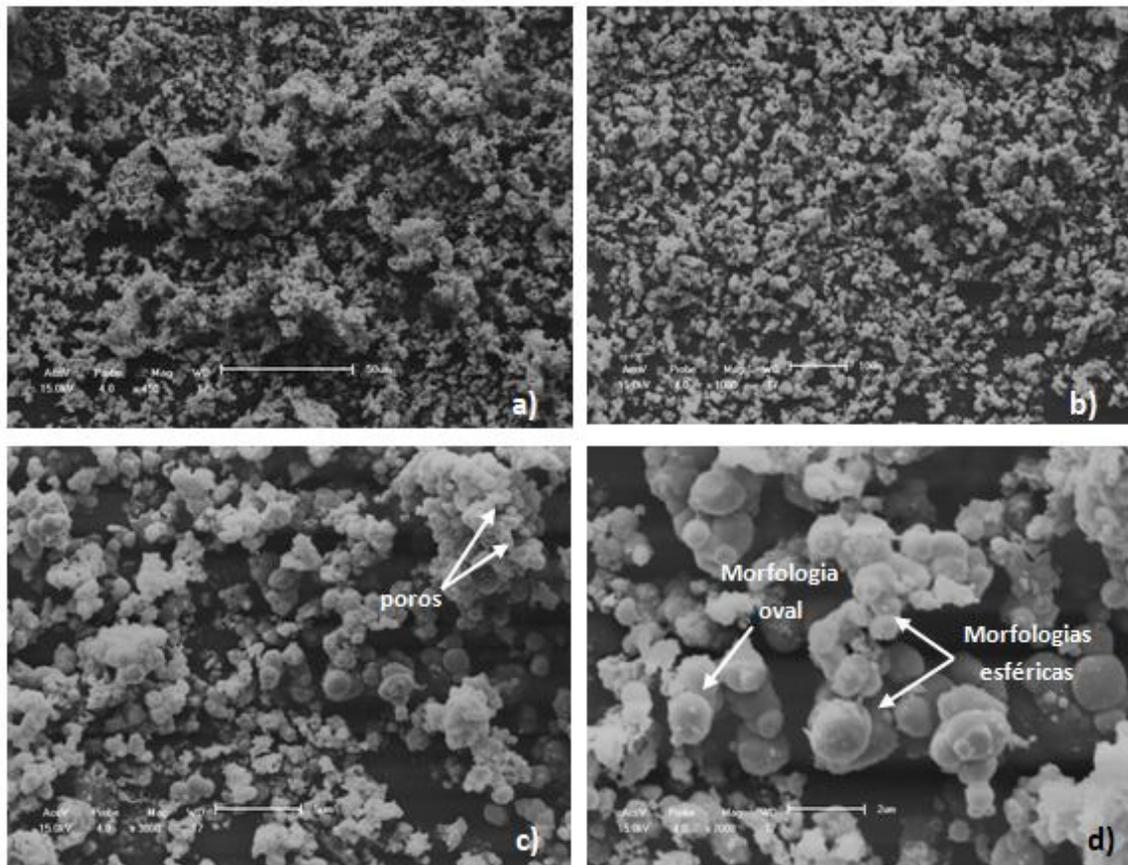


Figura III.8 – Microscopia eletrônica de varredura de amostras de lodo de galvanoplastia: (a) ampliação 450 vezes, 50 µm (b) ampliação 1000 vezes, 10 µm (c) ampliação 3000 vezes, 5 µm (d) ampliação 7000 vezes, 2 µm

### 3.2.6 Metais

Os resultados médios da concentração de metais totais presentes nas amostras dos resíduos, bem como o desvio padrão estão apresentados na Tabela III.8.

Foi possível verificar que sódio (Na) e alumínio (Al) foram os metais que se apresentaram em maiores concentrações em peso seco na amostra de poeira de jateamento. A alta concentração desses metais pode ser explicada pela própria composição das microesferas de vidro. Além da sílica ( $\text{SiO}_2$ ) seu principal componente, o vidro também possui em sua composição carbonatos, sulfatos e óxidos de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ), e também óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), que podem atuar no aumento da resistência mecânica do mesmo.

Ferro (Fe), bário (Ba) e cobre (Cu) também se apresentaram em concentrações consideráveis na matriz da poeira de jateamento. Esses metais estão relacionados, muito provavelmente, com a composição química das peças que foram submetidas ao jateamento abrasivo.

Tabela III.8 – Concentração média dos metais totais presente nos resíduos

<i>Poeira de jateamento</i>		<i>Lodo de galvanoplastia</i>	
<i>Metal</i>	<i>Concentração (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Metal</i>	<i>Concentração (mg kg<sup>-1</sup>)</i>
Al	15.786,00 ± 3,0	Al	9.088,50 ± 0,2
Ba	3.438,50 ± 0,5	Ba	996,00 ± 1,3
Cd	6,35 ± 0,0	Cd	2,85 ± 0,0
Pb	178,10 ± 0,1	Pb	16,35 ± 0,0
Cu	2.277,10 ± 0,8	Cu	22,55 ± 0,0
Cr	126,40 ± 0,0	Cr	34,25 ± 0,0
Fe	4.631,60 ± 1,6	Fe	88.867,45 ± 2,3
Mn	34,80 ± 0,0	Mn	163,40 ± 0,0
Ag	0,55 ± 0,0	Ag	19,95 ± 0,0
Na	113.832,80 ± 31,4	Na	12.334,45 ± 1,3

Ferro (Fe), sódio (Na), alumínio (Al) e bário (Ba) também apresentaram concentrações significativas na matriz digerida do lodo de galvanoplastia. As concentrações de ferro, alumínio e bário estão relacionadas com a composição dos banhos eletrolíticos durante o processo de galvanoplastia. O sódio pode estar relacionado com o hidróxido de sódio (NaOH) presente nos banhos de decapagem (retirada de óxidos e gorduras das peças), bem como estar presente na composição dos detergentes utilizados na limpeza final das peças.

### 3.2.7 Lixiviação e Solubilização

A lixiviação e a solubilização são operações utilizadas para a extração de substâncias presentes em componentes sólidos por meio da sua dissolução em um solvente. A norma ABNT NBR 10004 (2004) utiliza-se dessas operações como um meio para a classificação da periculosidade de resíduos sólidos.

A Tabela III.9 apresenta as médias dos valores das concentrações de contaminantes encontrados por meio do ensaio de lixiviação dos resíduos de

galvanoplastia, bem como os valores limites desses mesmos contaminantes estipulados pelo anexo F da norma ABNT NBR 10004 (2004).

Tabela III.9 – Concentração de contaminantes presentes no extrato lixiviado dos resíduos

<i>Contaminante</i>	<i>Limite NBR 10004/2004 (mg L<sup>-1</sup>)</i>	<i>Poeira de jateamento (mg L<sup>-1</sup>)</i>	<i>Lodo de galvanoplastia (mg L<sup>-1</sup>)</i>
<i>Ba</i>	70,00	< 2,00	< 2,00
<i>Cd</i>	0,50	0,08	< 0,02
<i>Pb</i>	1,00	1,19	< 0,10
<i>Cr</i>	5,00	0,18	0,12
<i>Hg</i>	0,10	< 0,10	< 0,10
<i>Ag</i>	5,00	0,13	0,16
<i>Fluoreto (F<sup>-</sup>)</i>	150	n.d	n.d

Os valores indicados por < (menor que) estão abaixo do limite de detecção do espectrômetro de absorção atômica

n.d: não detectado pelo cromatógrafo de íons

Verifica-se na Tabela III.9 que na poeira de jateamento a concentração do metal chumbo (Pb) apresentou-se acima do valor máximo estipulado pela legislação supracitada. A presença de um metal no extrato lixiviado, em concentrações acima dos limites permitidos, implica em classificar o resíduo como resíduo sólido Classe I – Perigoso.

Para o lodo de galvanoplastia é possível observar que os contaminantes presentes no mesmo apresentaram-se em concentrações abaixo dos limites apresentados no anexo F da norma ABNT NBR 10004 (2004), dessa forma, o lodo de galvanoplastia pode ser classificado como Classe II – Não Perigoso.

Para a classificação do lodo galvânico em resíduo Classe II A (não inerte) ou Classe II B (inerte) é necessária a realização do ensaio de solubilização das amostras. Os resultados do ensaio de solubilização para o lodo e os valores limites de contaminantes no extrato solubilizado estabelecidos pela ABNT estão apresentados na Tabela III.10.

Mesmo não sendo necessário, o ensaio de solubilização também foi realizado nas amostras de poeira de jateamento para a posterior realização do cálculo da eficiência de remoção de contaminantes no extrato solubilizado que será apresentado no Capítulo IV.

Tabela III.10 - Concentração de contaminantes presentes no extrato solubilizado dos resíduos

<i>Contaminante</i>	<i>Limite NBR 10004/2004 (mg L<sup>-1</sup>)</i>	<i>Poeira de jateamento (mg L<sup>-1</sup>)</i>	<i>Lodo de galvanoplastia (mg L<sup>-1</sup>)</i>
<i>Al</i>	0,20	< 0,30	< 0,30
<i>Ba</i>	0,70	< 2,00	< 2,00
<i>Cd</i>	0,005	< 0,02	0,03
<i>Pb</i>	0,01	0,06	0,32
<i>Cu</i>	2,00	0,28	0,34
<i>Cr</i>	0,05	0,13	0,19
<i>Fe</i>	0,30	0,04	1,49
<i>Mn</i>	0,10	0,01	1,06
<i>Hg</i>	0,001	< 0,10	< 0,10
<i>Ag</i>	0,05	< 0,02	0,02
<i>Na</i>	200	86,73	252,06
<i>Cloreto (Cl<sup>-</sup>)</i>	250	n.d	n.d
<i>Fluoreto (F<sup>-</sup>)</i>	1,50	n.d	n.d
<i>Nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</i>	10,00	n.d	n.d
<i>Sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</i>	250	n.d	n.d

Os valores indicados por < (menor que) estão abaixo do limite de detecção do espectrômetro de absorção atômica

n.d: não detectado pelo cromatógrafo de íons

Como pode ser observado nos resultados dos ensaios de solubilização, o lodo de galvanoplastia apresentou concentrações de seis metais, cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr), ferro (Fe), manganês (Mn) e sódio (Na) acima dos valores estabelecidos na legislação, sendo classificado como resíduo Classe II A (não perigoso, não inerte).

### 3.3 Conclusões Parciais

Os resultados da caracterização dos resíduos galvânicos estudados no presente trabalho permitiram o desenvolvimento de algumas conclusões:

- A análise granulométrica dos resíduos mostrou que ambos são aptos para utilização na fabricação de concretos, pois, apresentaram-se como materiais muito finos, com granulometria dentro das faixas granulométricas de alguns subprodutos industriais utilizados como aditivos minerais em concreto;
- Na composição química dos resíduos foram observados compostos comumente encontrados na composição do cimento, tais como, SiO<sub>2</sub>, CaO e MgO presentes em grandes quantidades na poeira de jateamento e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presente no lodo de galvanoplastia. A adição dos resíduos com esses compostos na massa cimentícia

pode contribuir para o aumento da formação de produtos da hidratação do cimento responsáveis pelas características de resistência do concreto, podendo melhorar as propriedades mecânicas das peças fabricadas;

- Apesar de ser classificado como um resíduo perigoso, a poeira de jateamento mostrou-se um resíduo com grande potencial para utilização na produção de blocos de concreto para pavimentação, principalmente pela sua atividade pozolânica com o cimento comprovada pelas análises químicas e de difração de raios-x;
- O lodo galvânico também apresentou outras características favoráveis para sua utilização em concretos, sendo definido como uma substância amorfa com grande reatividade e classificado como resíduo sólido não perigoso, não inerte;
- Os resultados da caracterização apresentados também vêm confirmar que a solidificação/estabilização utilizando-se cimento pode ser uma das técnicas mais indicadas para o tratamento/reaproveitamento desse tipo de rejeito, principalmente devido a considerável quantidade de metais presentes na matriz dos resíduos.

## CAPÍTULO IV

### 4 FABRICAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO EM ESCALA PILOTO

A segunda parte do programa experimental consistiu na fabricação dos blocos de concreto em escala piloto, com diferentes porcentagens de resíduo em substituição aos agregados miúdos do concreto. A avaliação de suas propriedades físico-químicas, mecânicas e microestruturais, com foco na determinação da quantidade ideal de resíduo a ser utilizado e na verificação da estabilização/solidificação dos contaminantes na matriz de cimento, também foi objeto de investigação nessa etapa.

#### 4.1 Metodologia

##### 4.1.1 Materiais utilizados

A seguir, são listados todos os materiais que foram utilizados na fabricação dos blocos de concreto para pavimentação em escala piloto.

##### 4.1.1.1 Aglomerante

O cimento empregado na fabricação dos blocos foi o cimento Portland CP V - ARI da marca Cauê, uma vez que este tipo de cimento é o mais utilizado pelos fabricantes de blocos de pavimentos e peças pré-moldadas em geral. A Tabela IV.1 apresenta algumas características desse tipo de cimento fornecidas pelo fabricante.

Tabela IV.1 – Especificações cimento CP V - ARI

	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>				<i>Início pega (min)</i>	<i>Fim pega (min)</i>	<i>Massa específica (g cm<sup>-3</sup>)</i>
	<i>Idades</i>	<i>24 horas</i>	<i>3 dias</i>	<i>7 dias</i>			
<i>NBR 5737/ NBR 5733</i>	≥ 14	≥ 24	≥ 34	-	≥ 60	≥ 600	-
<i>CP V ARI CAUE</i>	28*	39*	44*	51*	160*	270*	2,99**

Fonte: Intercement (2011)

\* Valores médios obtidos do mapa da qualidade do CPV ARI da unidade de Ijaci/MG no período de janeiro a novembro de 2009.

\*\* Valor medido em laboratório pelo autor de acordo com NM 23 (2000).

Amostras do cimento utilizado na fabricação dos blocos também foram submetidas a uma caracterização por meio da determinação da concentração de metais, lixiviação, solubilização, fluorescência de raios-x, difração de raios-x e microscopia eletrônica de varredura. Todas as análises foram realizadas com as mesmas metodologias e equipamentos utilizados na caracterização dos resíduos.

#### *4.1.1.2 Agregado miúdo*

O agregado miúdo utilizado na fabricação das peças pré-moldadas foi a areia média natural que foi submetida a análise de composição granulométrica conforme a norma ABNT NBR NM 248 (2003), massa específica conforme a norma ABNT NBR NM 52 (2009) e massa unitária conforme a norma ABNT NBR NM 45 (2006).

#### *4.1.1.3 Agregado Graúdo*

O pedrisco utilizado como agregado graúdo também foi submetido a ensaios de granulometria, massa específica e massa unitária conforme as normas ABNT NBR NM 248 (2003), ABNT NBR NM 53 (2009) e ABNT NBR NM 45 (2006) respectivamente.

#### *4.1.1.4 Água*

A água utilizada foi a disponível para o abastecimento do município de Maringá - PR, fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

### **4.1.2 Determinação dos traços e proporcionamento dos materiais empregados**

O traço do concreto é uma espécie de “receita”, ou seja, a indicação correta das proporções entre as matérias-primas a serem empregadas na confecção do concreto ou argamassa. Na maior parte das vezes a dosagem do concreto para determinação do traço ideal é feita empiricamente, por meio de tentativa e erro, de acordo com os equipamentos disponíveis para a fabricações dos blocos de concreto.

Como não existe um método de dosagem consagrado para concretos com consistência seca, como no caso dos pavers, no presente trabalho optou-se pela utilização do traço desenvolvido por Franco (2011). Como a autora citada obteve bons resultados e seu estudo foi desenvolvido nos mesmos equipamentos e com os mesmos materiais utilizados no presente trabalho, essa escolha foi justificável, pois os traços já

estariam de acordo com a característica particular da máquina vibro-compressora utilizada na moldagem dos blocos.

A Tabela IV.2 apresenta o traço referência com as proporções (em massa) de matérias-primas utilizadas na fabricação dos blocos.

Tabela IV.2 – Traço referência

<i>Traço</i>	<i>A/G</i>	<i>Cimento</i>	<i>Areia</i>	<i>Resíduo</i>	<i>Pedrisco</i>
<i>Referência</i>	0,40	1,00	2,50	0,00	1,35

Fonte: Franco (2011)

A/G: relação água/aglomerante

A partir do traço referência, foram propostos outros traços de acordo com as porcentagens desejadas de resíduos em substituição ao agregado miúdo. Os teores de resíduos utilizados foram: 2%, 3%, 4%, 5% e 10%. A Tabela IV.3 apresenta a quantidade de cimento e a composição dos traços (em massa, kg) para a fabricação dos blocos de concreto para pavimento com incorporação tanto de poeira de jateamento quanto lodo de galvanoplastia.

Tabela IV.3 – Traços utilizados na fabricação dos pavers com incorporação de resíduos

<i>Traço</i>	<i>A/G</i>	<i>Cimento</i>	<i>Areia</i>	<i>Resíduo</i>	<i>Pedrisco</i>
Referência	0,40	1,00	2,50	0,00	1,35
2%	0,40	1,00	2,45	0,05	1,35
3%	0,40	1,00	2,43	0,07	1,35
4%	0,40	1,00	2,40	0,10	1,35
5%	0,40	1,00	2,38	0,12	1,35
10%	0,40	1,00	2,25	0,25	1,35

Referência – corpos-de-prova sem adição de resíduo

A/G – relação água/aglomerante

O limite de incorporação máximo de 10% de resíduos galvânicos na massa de concreto se deveu à constatação apresentada no estudo de Franco (2011) em que, incorporações acima desse valor causavam consideráveis perdas de resistência à compressão em blocos de concreto.

### 4.1.3 Fabricação

Após a caracterização dos resíduos e definição dos traços, foi feita a fabricação dos blocos de concreto para pavimentação. A fabricação das peças foi executada na Fábrica de Artefatos da Universidade Estadual de Maringá e os pavimentos produzidos tinham dimensões de 100 mm (largura) x 200 mm (comprimento) x 80 mm (altura).

A primeira etapa do processo foi a pesagem dos materiais utilizados na fabricação do concreto (cimento, água, areia, brita e resíduos) de acordo com os respectivas quantidades pré-estabelecidas e apresentadas na Tabela IV.3. Posteriormente os materiais foram transferidos para a betoneira autocarregável (Figura IV.1) onde ocorreu a mistura do concreto.



Figura IV.1 - Betoneira autocarregável utilizada na fabricação dos blocos

Em seguida, o concreto produzido foi transferido manualmente para uma vibroprensa pneumática semiautomática (Figura IV.2 a) com ciclos de vibração de 30 segundos e capacidade de produção de oito blocos por ciclo.



Figura IV.2 – (a) vibro-prensa pneumática e (b) desforma dos blocos em paletes

Após a moldagem na vibro-prensa, foi realizada a desforma dos blocos sobre paletes de madeira (Figura IV.2 b). Os blocos fabricados ficaram dispostos em local protegido das intempéries do tempo, para cura natural durante três dias. Posteriormente foram transportados até o Laboratório de Construção Civil da UEM, onde foram acondicionados em câmara úmida para a cura até as idades desejadas para os ensaios previstos no programa experimental.

#### **4.1.4 Resistência à compressão**

O ensaio de resistência à compressão é um parâmetro importante de controle de qualidade mecânica dos blocos de concreto para pavimentação. É também um fator de grande interesse de projetistas e engenheiros. Seus limites de exigência estão presentes, tanto nas normas nacionais, quanto em normas internacionais de pavimentos intertravados.

A resistência à compressão é definida com sendo a capacidade de um material resistir à tensão de compressão sem se romper. No concreto a resistência está relacionada à tensão necessária para causar ruptura, sendo definida como a tensão máxima que a amostra de concreto pode suportar (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

A necessidade da obtenção de valores de resistência à compressão dos blocos de concreto fabricados teve o objetivo de verificar a influência da incorporação dos resíduos nas características mecânicas das peças, bem como a adequação dos mesmos às normas vigentes.

Os ensaios de resistência à compressão nos blocos foram conduzidos segundo as recomendações da norma ABNT NBR 9781 (2013) (Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio), com a utilização de prensa hidráulica (Figura IV.3 a). Foram empregados seis corpos-de-prova para cada traço, na idade de cura de 28 dias. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Construção Civil da UEM.

Para a realização do ensaio de acordo com a norma supracitada, os blocos de concreto foram previamente capeados com enxofre, e em seguida dispostos na prensa hidráulica sobre placas auxiliares (discos de aço de diâmetro de  $85 \pm 0,5$  mm), conforme apresentado na Figura IV.3 (b). Em seguida, foi aplicada uma carga de compressão nos pavers para simular o esforço máximo que o corpo-de-prova suportaria até sua ruptura.



Figura IV.3 – (a) Prensa hidráulica e (b) bloco preparado para o ensaio de compressão

A resistência à compressão (em MPa) das peças foi obtida dividindo-se a carga de ruptura (em Newtons, N) pela área de carregamento (em mm<sup>2</sup>) (área das placas auxiliares), multiplicando-se o resultado pelo fator “p”, função da altura da peça, conforme apresentado na Tabela IV.4.

Tabela IV.4 – Fator multiplicativo “p” (NBR 9781, 2013)

<i>Altura nominal da peça (mm)</i>	<i>Fator multiplicativo “p”</i>
60	0,95
80	1,00
100	1,05

A resistência à compressão estimada ( $f_{pk,est}$ ) (em MPa) em função da resistência média das peças ensaiadas para cada traço foi calculada de acordo com a equação (IV.1).

$$f_{pk,est} = f_p - t \cdot s \quad (IV.1)$$

Em que:

$f_{pk,est}$ : Resistência característica estimada à compressão, em MPa

$f_p$ : Resistência média das peças ensaiadas, em MPa

t: Coeficiente de *student*, fornecido em tabela disponível na NBR 9781 (2013), em função do tamanho da amostra.

s: Desvio padrão da amostra, em MPa.

#### **4.1.5 Absorção de água**

A absorção de água é outra característica de grande importância na avaliação da qualidade dos blocos intertravados de concreto. É uma das propriedades que consta nas normas brasileiras específicas para pavers e também está presente como padrão de qualidade em normas europeias e norte-americanas.

Segundo Fioriti (2007), a absorção de água por imersão está relacionada com a medição do volume de poros do concreto, e não à facilidade com que o fluido penetra no mesmo. A absorção de água está intimamente ligada aos vazios (poros) existentes na matriz de cimento. Quanto maior a porosidade das peças, maior sua absorção de água. Esses espaços não preenchidos podem vir a ocasionar perda de durabilidade e de resistência mecânica das peças, assim como aumento da lixiviação de substâncias químicas contidas na mesma.

Os ensaios para a determinação da absorção de água nos blocos de concreto para pavimentação também foram baseados na metodologia proposta pela norma ABNT NBR 9781 (2013). No procedimento foram empregados dois corpos-de-prova para cada traço na idade de cura de 28 dias. De acordo com a referida norma a absorção de água, expressa em porcentagem, representa o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco.

A metodologia para a determinação da absorção de água consiste na imersão dos corpos-de-prova em água à temperatura de  $23 \pm 5^\circ\text{C}$  por 24 horas, posteriormente cada corpo-de-prova foi pesado (drenando-se a água superficial com o auxílio de uma tela metálica) obtendo-se ( $m_2$ ). Em seguida, os blocos foram submetidos à secagem em estufa na temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  por 24 horas. Após a secagem, os corpos-de-prova foram pesados novamente até obtenção de massa constante, obtendo-se ( $m_1$ ). A Figura IV.4 apresenta a imagem da estufa de secagem e dos pavers imersos em água. Os ensaios também foram realizados no Laboratório de Construção Civil da UEM.

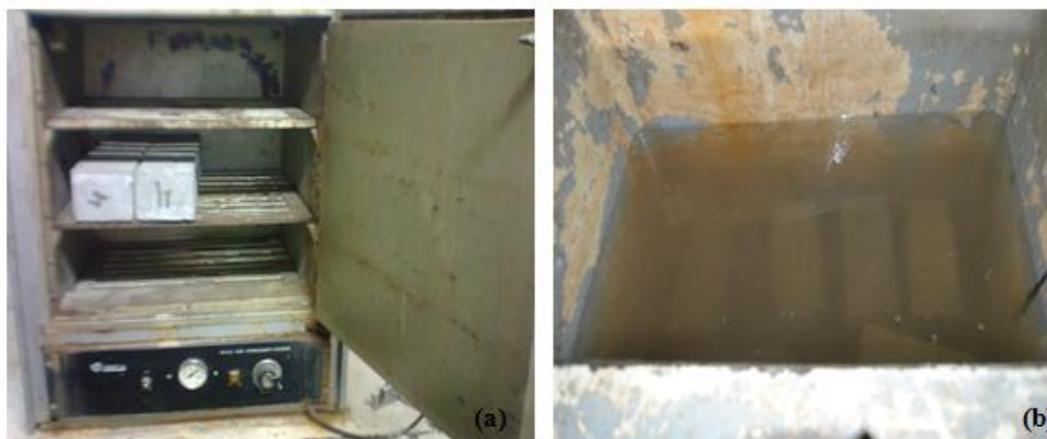


Figura IV.4 – Ensaio de absorção de água: (a) secagem dos pavers em estufa e (b) pavers imersos no tanque de água para saturação

O valor da absorção de água de cada bloco foi calculado pela seguinte equação:

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (\text{IV.2})$$

Em que:

A: absorção de cada corpo de prova, em porcentagem (%)

M<sub>1</sub>: massa do corpo de prova seco, em gramas (g)

M<sub>2</sub>: massa do corpo de prova saturado, em gramas (g)

#### 4.1.6 pH

O pH das amostras também foi avaliado, pois seus valores podem influenciar diretamente nos processos de lixiviação e solubilização de metais. Segundo LU *et al.*, (1985), o pH do extrato solubilizado de determinado material ou resíduo afeta a especiação dos contaminantes, influenciando na precipitação e dissolução dos mesmos. Em condições de pH ácido ocorre aumento da solubilização dos constituintes químicos e diminuição da capacidade dos contaminantes de se ligarem com o aglomerante utilizado.

O pH das amostras dos blocos de concreto foi medido de acordo com a norma ABNT NBR 10005 (2004). O procedimento consistiu na transferência de 5 g de amostra seca, triturada e peneirada para um béquer com a adição de 96,5 mL de água deionizada. Em seguida, a mistura foi agitada com agitador magnético por 5 minutos. A medição do

pH foi realizada em um equipamento digital DIGIMED<sup>®</sup> em amostras com idade de cura de 28 dias.

#### **4.1.7 Ensaios de lixiviação/solubilização**

Os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados para a classificação da periculosidade das peças fabricadas, após o seu período de vida útil, e também para avaliação do processo de estabilização/solidificação dos resíduos na matriz cimentícia. O ensaio de lixiviação é o ensaio mais comum para avaliar a imobilização dos contaminantes. Ele avalia o potencial do material lixiviado em liberar determinados tipos de contaminantes e conseqüentemente fornece informações sobre a classificação do resíduo, além de avaliar se o mesmo deve ser submetido a um processo de tratamento (REDDI e INYANG, 2000).

Os ensaios de lixiviação e solubilização dos corpos-de-prova foram realizados utilizando-se as metodologias estabelecidas pelas normas ABNT NBR 10005 (2004) (que segue o método 1311 US EPA SW-846) e ABNT NBR 10006 (2004), respectivamente. Os procedimentos foram realizados em amostras (previamente coletadas dos fragmentos dos blocos submetidos aos ensaios de resistência à compressão) dos blocos fabricados com cada um dos traços pré-estabelecidos, na idade de cura de 28 dias.

O procedimento para obtenção do extrato lixiviado consistiu na pesagem de 50 g de amostra seca, triturada e peneirada e sua transferência para um frasco de lixiviação juntamente com 1 litro de solução de ácido acético. O frasco foi vedado e colocado em um aparelho chamado “agitador rotativo de frascos” (Figura IV.5). As amostras permaneceram sob agitação por 18 horas a 30 rpm. Em seguida as amostras foram filtradas em membrana de 0,45 µm e acondicionadas em frascos identificados, seguindo para a leitura do teor de contaminantes. Todas as leituras foram feitas em duplicata.



Figura IV.5 – Agitador rotativo de frasco utilizado nos ensaios de lixiviação

Para os ensaios de solubilização as amostras também foram secas por 24 horas em estufa a 42°C, trituradas e peneiradas. Em seguida, ocorreu a pesagem de 250 g de cada amostra que foram transferidas para frascos PET de 2 litros. Adicionava-se ao frasco 1 litro de água deionizada, agitando-se por 5 minutos. Os frascos foram fechados e deixados para descanso por 7 dias na temperatura ambiente. Após esse período, as amostras foram filtradas à vácuo em membrana 0,45  $\mu\text{m}$ , armazenadas em frascos menores para posterior leitura de contaminantes. Tanto o extrato lixiviado como o extrato solubilizado, foram submetidos à detecção dos teores de alguns contaminantes listados nos anexos F e G da norma ABNT NBR 10004 (2004), por meio de Espectrômetro de Absorção Atômica e Cromatógrafo de íons instalados no Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP/UEM).

#### 4.1.7.1 Cálculo da eficiência de retenção de metais

O principal objetivo no processo de estabilização/solidificação de um resíduo é a verificação da capacidade de retenção/fixação, nas matrizes solidificadas, dos elementos presentes em excesso no resíduo bruto. De acordo com Pablos (2008), os ensaios que submetem essas matrizes a um contato dinâmico ou estático com água destilada ou deionizada (ensaios de solubilização), são as referências para a análise do processo. Já Brito (2007) utiliza os ensaios de lixiviação como base para avaliar essa capacidade de retenção de contaminantes.

Diante disso, considera-se de extrema importância a comparação entre os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo bruto e os resultados dos ensaios das matrizes solidificadas (blocos de concreto). Esta comparação foi feita por

meio da determinação da eficiência de retenção dos metais na matriz de cimento e foi calculada por meio da equação (IV.3):

$$E_{retenção} = \frac{C_{bruto} - C_{tratado}}{C_{bruto}} \times 100 \quad (IV.3)$$

Em que:

$E_{retenção}$ : Eficiência de retenção, em porcentagem (%)

$C_{bruto}$ : Concentração do metal no extrato lixiviado/solubilizado do resíduo bruto, em ( $mg L^{-1}$ )

$C_{tratado}$ : Diferença entre a concentração do metal lixiviado/solubilizado nos blocos sem adição do resíduo (referência) e com adição do resíduo, em ( $mg L^{-1}$ )

#### **4.1.8 Fluorescência de raios-x, Difração de raios-x e Microscopia eletrônica de varredura**

As amostras foram submetidas à análises de fluorescência de raios-x (FRX) e difração de raios-x (DRX) no COMCAP/UEM nos mesmos equipamentos utilizados para a caracterização microestrutural dos resíduos galvânicos. Já a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada no Laboratório de Microscopia e Microanálise da Universidade Estadual de Londrina (UEL). As micrografias foram obtidas por meio do microscópio eletrônico de varredura de elétrons Philips FEI Quanta 200, operando com tensão de 30 kV, com capacidade de aumento de 50 a 20.000 vezes.

Para a realização dessas análises foram coletadas amostras de superfície de fratura dos corpos-de-prova rompidos nos ensaios de resistência à compressão na idade de 28 dias. As amostras coletadas foram secas e peneiradas para a obtenção de um pó fino e homogêneo e em seguida submetidas às análises supracitadas.

#### **4.1.9 Análise estatística dos resultados**

A análise estatística utilizada nos resultados de resistência à compressão, absorção de água e lixiviação/solubilização dos blocos foi realizada por meio da Análise de Variância (ANOVA), o teste de Tukey e o estudo da possível correlação entre as

variáveis. Foi utilizado o software estatístico STATISTICA 8.0 para a realização do estudo.

A ANOVA foi utilizada para verificar se existia diferença entre as médias das composições ou tratamentos, com determinado limite de confiança (99%), além de verificar a precisão das médias de cada composição ou tratamento (MONTGOMERY e RUNGER, 2013).

Se a ANOVA mostrar que existem diferenças significativas entre as médias dos tratamentos, é necessário aplicar o teste de Tukey. Este teste é utilizado para verificar quais médias são estatisticamente diferentes entre si ao nível de 1% de probabilidade. De acordo com o teste de Tukey, duas médias são diferentes entre si quando o valor absoluto da diferença entre eles for maior do que a diferença mínima significativa (d.m.s) calculada (BRITO, 2007).

A correlação linear foi aplicada para verificar a associação entre duas variáveis. Sua realização teve o intuito de encontrar uma possível relação entre os ensaios relacionados às propriedades mecânicas e físicas. A correlação foi realizada de acordo com Montgomery e Runger (2013) e Barbetta *et al.* (2004). Para atingir esse objetivo foram feitos diagramas de dispersão das observações das variáveis e o cálculo e interpretação do coeficiente de correlação ( $r$ ) das mesmas.

Os dados de resistência à compressão e absorção de água dos blocos também foram submetidos previamente ao Critério de Chauvenet para rejeição de dados.

Todas as metodologias utilizadas para a realização do estudo estatístico estão descritas nos ANEXOS A, B, C e D do presente trabalho.

## **4.2 Resultados e Discussão**

### **4.2.1 Características dos agregados e do cimento CP V – ARI**

#### *4.2.1.1 Agregados*

Os resultados dos ensaios de caracterização granulométrica da areia (agregado miúdo) e pedrisco (agregado graúdo), juntamente com outras características estão apresentados na Tabela IV.5 e Tabela IV.6, respectivamente. Suas curvas granulométricas estão apresentadas na Figura IV.6 e Figura IV.7.

Tabela IV.5 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo

<i>Abertura de Peneiras (mm)</i>	<i>Retido (%)</i>	<i>Retido acumulado acima (%)</i>
4,80	0,05	0,05
2,40	0,13	0,18
1,20	0,49	0,67
0,60	6,58	7,24
0,30	59,15	66,39
0,15	32,69	99,08
<i>Fundos</i>	0,83	99,91
<i>Módulo de finura</i>		1,74
<i>Dimensão máxima característica (mm)</i>		1,20
<i>Massa específica (kg dm<sup>-3</sup>)</i>		2,659
<i>Massa unitária no estado solto (kg dm<sup>-3</sup>)</i>		1,523

Observa-se na Tabela IV.5 que a areia utilizada pode ser classificada, segundo a ISSMFE, como areia média, com granulometria variando de 0,2 a 0,6 mm. A areia utilizada apresenta ainda um módulo de finura (soma das porcentagens retida e acumulada em massa de um agregado, nas peneiras da série nominal, dividida por 100) de 1,74 e dimensão máxima característica (que corresponde à abertura nominal em mm da malha da peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou inferior a 5% em massa) de 1,20; semelhante aos valores encontrados por Franco (2011).

A Figura IV.6 apresenta a curva granulométrica para a areia média utilizada na fabricação dos blocos de concreto, bem como os limites ótimos e utilizáveis de distribuição granulométrica estipulados pela norma ABNT NBR 7211 (2009).

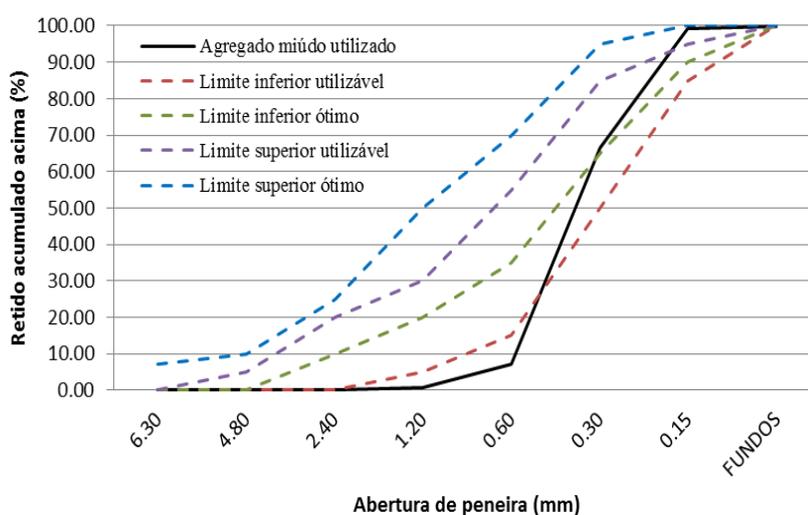


Figura IV. 6 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo

Como pode ser observado, a areia média utilizada encontrou-se, quase que totalmente, dentro dos limites de especificação para utilização como agregado miúdo na fabricação de concretos de cimento. Por meio desses resultados pode-se considerar esse agregado adequado comparado ao recomendado.

Tabela IV.6 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo

<i>Abertura de Peneiras (mm)</i>	<i>Retido (%)</i>	<i>Retido acumulado acima (%)</i>
12,70	0,45	0,45
9,50	0,78	1,22
6,30	50,81	52,03
4,80	35,61	87,64
2,40	9,68	97,32
1,20	0,56	97,88
0,60	0,26	98,14
0,30	0,23	98,37
0,15	0,24	98,61
Fundos	1,14	99,75
<i>Módulo de finura</i>		5,79
<i>Dimensão máxima característica</i>		9,50
<i>Massa específica (kg dm<sup>-3</sup>)</i>		2,01
<i>Massa unitária no estado solto (kg dm<sup>-3</sup>)</i>		1,47
<i>Absorção do agregado (%)</i>		6,49

A Figura IV.7 apresenta a distribuição granulométrica do agregado graúdo utilizado no presente trabalho, bem como os limites (inferior e superior) de granulometria exigíveis para o mesmo, para a sua utilização na fabricação de concretos, segundo a norma ABNT NBR 7211 (2009).

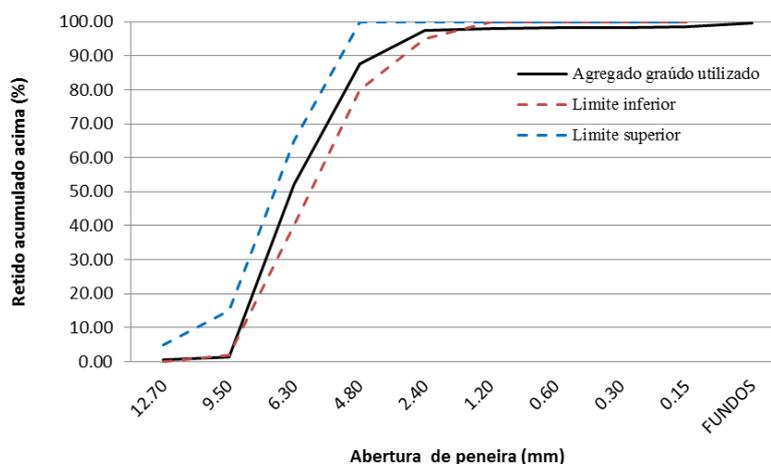


Figura IV. 7 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo

Os resultados mostraram que o pedrisco encontrou-se dentro dos limites de especificação estipulados pela norma supracitada, com sua granulometria variando de 2,4 mm a 9,5 mm. A Tabela IV.6 também apresenta outras características do pedrisco, como o módulo de finura de 5,97 e dimensão máxima característica de 9,50 mm, ambos os valores também estão em acordo com os valores encontrados por Franco (2011) para agregado graúdo.

#### 4.2.1.2 Cimento CP V – ARI

A Tabela IV.7 apresenta o resultado do ensaio de fluorescência de raios-x para a determinação da composição química de uma amostra do cimento CP V - ARI.

Como já era esperado, o óxido que se apresentou em maior quantidade nas amostras de cimento CP V - ARI foi o óxido de cálcio (CaO), principal elemento constituinte do cimento e base de sua matéria-prima, o calcário. Pode-se destacar também a presença de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), óxido de ferro III (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), anidrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Esses resultados vão ao encontro das observações feitas por Mehta e Monteiro (2008), os quais citam que a composição química dos cimentos é caracterizada pela presença de vários óxidos tais como: 3CaO.SiO<sub>2</sub>; 2CaO.SiO<sub>2</sub>; 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 3CaO.2SiO<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O.

Tabela IV.7 – Porcentagem em massa dos compostos encontrados em amostras do cimento CP V – ARI

<i>Compostos</i>	<i>% Massa</i>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,16
SiO <sub>2</sub>	7,97
CaO	80,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,50
SO <sub>3</sub>	2,55
SrO	0,73
K <sub>2</sub> O	1,28

A Figura IV.8 e Figura IV.9 apresentam respectivamente, os resultados das análises de difração de raios-x e de microscopia eletrônica de varredura realizadas em amostras do cimento utilizado na fabricação dos blocos de concreto.

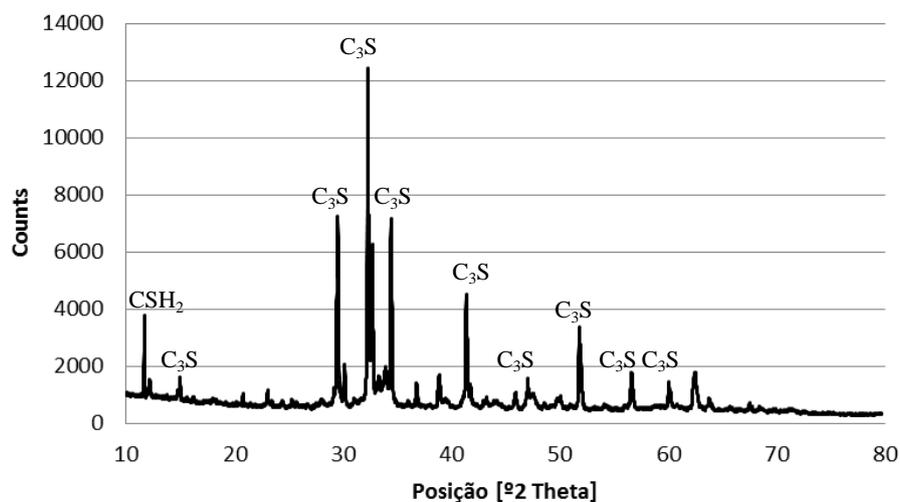


Figura IV.8 – Difratograma de uma amostra de cimento CP V - ARI

Por meio do difratograma da Figura IV.8 foi possível observar que o cimento CP V - ARI apresenta uma estrutura cristalina, evidenciada por picos bem definidos de silicato tricálcico ( $C_3S$ ) ou alita, e de sulfato de cálcio hidratado ( $CSH_2$ ) ou gesso/gipsita. A alita possui fórmula química ( $3CaO.SiO_2$ ) e é um silicato hidráulico comumente encontrado nos clínqueres de cimento Portland industrial, juntamente com o beta-silicato dicálcico ( $2CaO.SiO_2$ ).

Mehta e Monteiro (2008), afirmam que os silicatos compõem cerca de 75% do cimento comum, e têm um papel dominante nas características de endurecimento (taxa de desenvolvimento da resistência), pois sua reação com a água na hidratação do cimento é imediata.

O gesso ou gipsita tem fórmula química ( $CaSO_4.H_2O$ ) e é proveniente da adição de sulfato de cálcio na etapa de moagem do clínquer durante a produção do cimento. O objetivo principal dessa adição é o retardamento da tendência à pega rápida do clínquer devido à alta reatividade do mesmo.

A Figura IV.9 apresenta o resultado da análise de microscopia eletrônica de varredura feita em uma amostra do cimento. Pode-se observar grande disparidade de tamanhos entre as partículas do cimento. São partículas não agregadas e com morfologia em maioria angular. Essas características são provavelmente devidas ao processo de produção do clínquer de cimento.

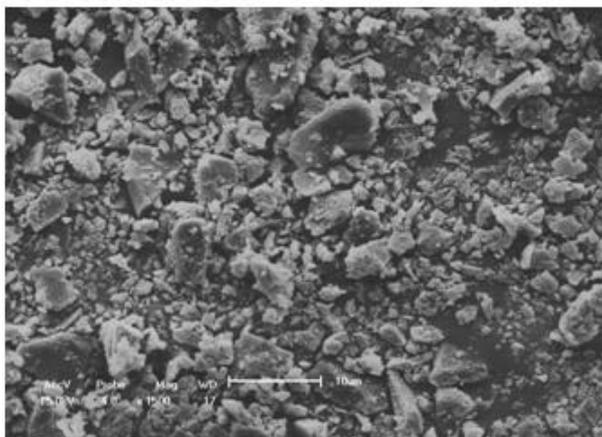


Figura IV.9 – Microscopia eletrônica de varredura de uma amostra de cimento CP V - ARI (ampliação 1500 vezes, 10 µm )

A Tabela IV.8 apresenta os valores das concentrações de diversos metais presentes na composição do cimento utilizado.

Tabela IV.8 – Concentração de metais presentes no cimento CP V - ARI

<i>Metal</i>	<i>Concentração (mg kg<sup>-1</sup>)</i>
Al	32.510,50 ± 0,9
Ba	44.862,50 ± 2,6
Cd	4,80 ± 0,0
Pb	54,20 ± 0,0
Cu	46,75 ± 0,0
Cr	90,95 ± 0,0
Fe	12.178,15 ± 0,6
Mn	298,25 ± 0,0
Ag	n.d
Na	959,95 ± 0,2

n.d: não detectado pelo equipamento de análise

Os metais que se apresentaram em maior concentração em peso seco na composição do cimento CP V – ARI foram o bário, alumínio e ferro. A presença do metal bário pode estar relacionada ao coprocessamento de resíduos incorporados na fabricação do cimento. O alumínio e o ferro são provenientes possivelmente das argilas (silicatos de alumínio hidratados que podem conter ferro, magnésio e sódio em sua composição), que junto com o calcário, são as principais matérias-primas utilizadas na fabricação do clínquer.

Os resultados das análises de lixiviação são apresentadas na Tabela IV.9.

Tabela IV.9 – Concentração de contaminantes presentes no extrato lixiviado do cimento

CP V - ARI

<i>Contaminante</i>	<i>Limite NBR 10004/2004 (mg L<sup>-1</sup>)</i>	<i>Cimento CP V - ARI (mg L<sup>-1</sup>)</i>
<i>Ba</i>	<i>70,00</i>	<i>56,59</i>
<i>Cd</i>	<i>0,50</i>	<i>&lt; 0,02</i>
<i>Pb</i>	<i>1,00</i>	<i>0,42</i>
<i>Cr</i>	<i>5,00</i>	<i>0,80</i>
<i>Hg</i>	<i>0,10</i>	<i>&lt; 0,10</i>
<i>Ag</i>	<i>5,00</i>	<i>0,07</i>
<i>Fluoreto (F<sup>-</sup>)</i>	<i>150</i>	<i>n.d</i>

Os valores indicados por < (menor que) estão abaixo do limite de detecção do espectrômetro de absorção atômica

n.d: não detectado pelo cromatógrafo de íons

Observa-se que as concentrações de contaminantes presentes do extrato lixiviado do cimento CP V - ARI apresentaram-se abaixo dos limites máximos estabelecidos pela ABNT NBR 10004 (2004), permitindo classificá-lo como resíduo Classe II – Não perigoso.

Os ensaios de solubilização para sua classificação como Classe II A (não inerte) e Classe II B (inerte) estão apresentados na Tabela IV.10. Com as concentrações de bário, cádmio, chumbo, cromo, ferro, manganês e sódio acima dos valores exigidos pela legislação para o solubilizado, os resultados obtidos permitem classificar o cimento CP V – ARI, quando de sua disposição final, como resíduo sólido Não perigoso – Não inerte (Classe II A).

Tabela IV.10 – Concentração de contaminantes presentes no extrato solubilizado do cimento CP V - ARI

<i>Contaminante</i>	<i>Limite NBR 10004/2004 (mg L<sup>-1</sup>)</i>	<i>Cimento (mg L<sup>-1</sup>)</i>
<i>Al</i>	0,20	< 0,30
<i>Ba</i>	0,70	10,52
<i>Cd</i>	0,005	0,03
<i>Pb</i>	0,01	0,36
<i>Cu</i>	2,00	< 0,03
<i>Cr</i>	0,05	0,49
<i>Fe</i>	0,30	0,91
<i>Mn</i>	0,10	0,71
<i>Hg</i>	0,001	< 0,10
<i>Ag</i>	0,05	< 0,02
<i>Na</i>	200	200,21
<i>Cloreto (Cl<sup>-</sup>)</i>	250	1,02
<i>Fluoreto (F<sup>-</sup>)</i>	1,50	0,95
<i>Nitrato (NO<sup>3-</sup>)</i>	10,00	1,15
<i>Sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</i>	250	n.d

Os valores indicados por < (menor que) estão abaixo do limite de detecção do espectrômetro de absorção atômica

n.d: não detectado pelo cromatógrafo de íons

#### 4.2.2 Lixiviação, Solubilização e pH dos blocos de concreto

A Tabela IV.11 mostra os resultados dos ensaios de lixiviação dos blocos de concreto para pavimentação fabricados com poeira de jateamento.

Verifica-se pela Tabela IV.11 que nenhum dos metais avaliados foram encontrados no extrato lixiviado acima dos valores estabelecidos na norma ABNT NBR 10004 (2004). Esses resultados permitem inferir que os blocos de concreto para pavimentação, com incorporação de poeira de jateamento, não trarão problemas de contaminação ambiental durante sua utilização na pavimentação e ainda, que após sua vida útil, quando descartados, devem ser classificados como resíduo Classe II – Não Perigoso.

Tabela IV.11 – Concentração de contaminantes presentes no extrato lixiviado dos blocos fabricados com poeira de jateamento aos 28 dias de cura

Contaminante	Limite NBR	Ref.	2%	3%	4%	5%	10%
	10004/2004 (mg L <sup>-1</sup> )						
Ba	70,00	42,43	51,85	36,36	41,78	60,93	47,49
Cd	0,50	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Pb	1,00	0,38	0,37	0,36	0,35	0,38	0,37
Cr	5,00	< 0,06	0,17	0,17	0,17	0,16	0,15
Hg	0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Ag	5,00	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Fluoreto (F <sup>-</sup> )	150	n.d	n.d	n.d	0,127	n.d	0,124

Os valores indicados por < (menor que) estão abaixo do limite de detecção do aparelho utilizado

A Tabela IV.12 mostra um resumo da análise de variância para as médias das concentrações de metais lixiviados dispostos na Tabela IV.11. Como os metais cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e prata (Ag) não apresentaram variância nas concentrações em função do acréscimo de resíduo, não foi necessário incluí-los nesta análise.

Tabela IV.12 – Resumo da análise ANOVA para lixiviação dos blocos fabricados com poeira de jateamento

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média quadrática	F	Pvalor
Ba	5	757,60	151,52	1,7011	0,2674
Pb	5	0,001451	0,000290	2,980	0,1079
Cr	5	0,018313	0,003663	40,139	0,00015*

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Pvalor < 0,01)

Por meio da análise estatística foi possível observar que também não houve diferenças significativas entre as médias de concentrações dos metais bário e chumbo presentes no lixiviado dos blocos referência e dos blocos fabricados com poeira de jateamento ao nível de 1% de probabilidade.

Somente para o cromo houve significância para o teste (Pvalor < 0,01). Aplicando o teste de Tukey para esse metal, foi possível observar que a concentração média de cromo lixiviado nos blocos referência foi inferior que as demais concentrações, num intervalo de confiança de 99%. Entretanto, mesmo essa diferença sendo significativa ao nível estatístico, não alterou as características de periculosidade do extrato lixiviado dos blocos de concreto fabricados com resíduo.

A Tabela IV.13 mostra os resultados dos ensaios de solubilização dos blocos com teores de poeira de jateamento. O teste de solubilização é necessário, pois fixa as

condições exigíveis para diferenciar os resíduos da Classe II A – não inertes e Classe II B – inertes.

Tabela IV.13 - Concentração de contaminantes presentes no extrato solubilizado dos blocos fabricados com poeira de jateamento aos 28 dias de cura

Contaminante	Limite NBR						
	10004/2004 (mg L <sup>-1</sup> )	Ref.	2%	3%	4%	5%	10%
Al	0,20	2,22	2,93	2,80	1,94	4,31	3,32
Ba	0,70	17,12	18,03	9,88	11,77	15,74	13,10
Cd	0,005	0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Pb	0,01	0,19	0,17	0,15	0,17	0,17	0,18
Cu	2,00	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Cr	0,05	0,07	0,06	0,07	0,06	0,07	0,08
Fe	0,30	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	0,09
Mn	0,10	0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Hg	0,001	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Ag	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Na	200	21,92	29,42	34,16	31,21	42,16	46,74
Cloreto(Cl <sup>-</sup> )	250	n.d	0,96	n.d	0,42	27,05	0,48
Fluoreto(F <sup>-</sup> )	1,50	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Nitrato(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	10,00	6,87	2,48	4,58	1,86	1,84	3,14
Sulfato(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	250	15,00	58,68	17,49	33,56	4,13	4,00

Os valores indicados por < (menor que) estão abaixo do limite de detecção do aparelho utilizado

Alumínio, bário, chumbo e cromo foram os metais que solubilizaram em concentrações acima dos limites estipulados pela norma ABNT NBR 10004 (2004), tanto nos blocos referência quanto nos blocos com incorporação de 2%, 3%, 4%, 5% e 10% de resíduo. Tais resultados permitem classificar os resíduos dos blocos de concreto para pavimentação, incorporados com poeira de jateamento, como Classe II A – não perigoso, não inerte. As concentrações de cádmio e mercúrio foram inconclusivas no que diz respeito à legislação, devido ao limite de detecção do aparelho utilizado na realização da análise.

Ao observar a Tabela IV.13 foi possível verificar que não houve diferenças nas concentrações de cádmio (Cd), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), mercúrio (Hg) e prata (Ag) presentes no solubilizado dos pavimentos fabricados com poeira de jateamento e dos pavimentos referência. Para os demais metais foi realizada uma análise de variância que está disposta na Tabela IV.14.

Tabela IV.14 – Resumo da análise ANOVA para solubilização dos blocos fabricados com poeira de jateamento

<i>Fonte de variação</i>	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Soma dos quadrados</i>	<i>Média quadrática</i>	<i>F</i>	<i>Pvalor</i>
<i>Al</i>	5	8,9031	1,78062	0,8231	0,5753
<i>Ba</i>	5	102,459	20,492	1,0604	0,4633
<i>Pb</i>	5	0,00163	0,000325	9,132	0,00897*
<i>Cr</i>	5	0,00031	0,000062	0,3863	0,8421
<i>Na</i>	5	806,22	161,24	192,90	0,0000*

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Pvalor < 0,01)

O chumbo (Pb) e o sódio (Na) foram os metais que apresentaram significância para o teste. Para o chumbo, a concentração encontrada nos blocos fabricados com 3% de poeira de jateamento foi inferior e significativamente diferente da concentração encontrada nos blocos referência. Para o sódio, a concentração do metal no bloco referência foi inferior e diferente das demais com 99% de confiança.

Foi possível observar que a concentração de sódio no solubilizado dos blocos tende a aumentar com o aumento do teor de resíduo. Isso pode estar relacionado à alta concentração de sódio presente na matriz da poeira de jateamento. Entretanto, mesmo com esse aumento, as concentrações do metal no solubilizado apresentaram-se bem abaixo dos limites permitidos pela normativa. Esses resultados são uma constatação de que a utilização da poeira de jateamento na fabricação de blocos de concreto para pavimentação não interferiu significativamente na lixiviação nem na solubilização dos metais.

Os resultados da concentração de contaminantes presente no extrato lixiviado dos pavimentos fabricados com lodo galvânico estão apresentados na Tabela IV.15.

Tabela IV.15 – Concentração de contaminantes presentes no extrato lixiviado dos blocos fabricados com lodo galvânico aos 28 dias de cura

<i>Contaminante</i>	<i>Limite NBR</i>	<i>Ref.</i>	<i>2%</i>	<i>3%</i>	<i>4%</i>	<i>5%</i>	<i>10%</i>
	<i>10004/2004</i> ( <i>mg L<sup>-1</sup></i> )						
<i>Ba</i>	70,00	42,43	55,63	61,55	44,81	63,40	51,39
<i>Cd</i>	0,50	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
<i>Pb</i>	1,00	0,38	0,38	0,39	0,31	0,33	0,23
<i>Cr</i>	5,00	< 0,06	0,20	0,20	0,19	0,27	0,21
<i>Hg</i>	0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
<i>Ag</i>	5,00	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
<i>Fluoreto (F<sup>-</sup>)</i>	150	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

Os valores indicados por < (menor que) estão abaixo do limite de detecção do aparelho utilizado

As concentrações de metais presentes no extrato lixiviado dos blocos incorporados com lodo galvânico apresentaram-se dentro dos valores limites estipulados pela norma ABNT NBR 10004 (2004), classificando seus resíduos como Classe II – não perigoso. Foi verificado que não houve alteração nas concentrações de cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e prata (Ag) no lixiviado dos blocos devido ao acréscimo de lodo. Para os demais metais foi realizada uma análise de variância, cujos resultados estão dispostos na Tabela IV.16.

Tabela IV.16 – Resumo da análise ANOVA para lixiviação dos blocos fabricados com lodo galvânico

<i>Fonte de variação</i>	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Soma dos quadrados</i>	<i>Média quadrática</i>	<i>F</i>	<i>Pvalor</i>
<i>Ba</i>	5	738,66	147,73	21,261	0,00094*
<i>Pb</i>	5	0,02576	0,005152	32,298	0,00029*
<i>Cr</i>	5	0,073612	0,014722	161,664	0,00000*

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Pvalor < 0,01)

A análise ANOVA mostrou que ao nível de 1% de probabilidade houve diferenças significativas entre todas as composições, pois o Pvalor foi menor que 0,01. Aplicando-se o teste de Tukey para saber quais médias são diferentes entre si, constatou-se que para o bário (Ba) a concentração obtida no bloco referência foi inferior e significativamente diferente das concentrações encontradas nos blocos com incorporação de 3% e 5% de lodo galvânico. Para o chumbo a concentração no bloco referência foi superior e diferente das encontradas nos blocos com teores de 4% e 10%. Porém para ambos os metais não foi verificada correlação entre aumento no teor de resíduo e concentração dos metais no lixiviado.

No que diz respeito ao metal cromo (Cr), a concentração presente no bloco referência apresentou-se inferior e significativamente diferente das demais. A substituição parcial do agregado miúdo por lodo galvânico provocou um aumento de aproximadamente 3,5 vezes na concentração de cromo presente no lixiviado dos blocos, porém esse aumento não foi suficiente para extrapolar os limites previstos pela norma brasileira.

Os resultados da Tabela IV.17 permitiram classificar os resíduos dos blocos de concreto fabricados com lodo de galvanoplastia como Classe IIA – não perigoso, não inerte, pois cerca de cinco metais (Al, Ba, Cd, Pb e Cr) apresentaram concentrações solubilizadas acima dos limites exigidos pela legislação.

Tabela IV.17 - Concentração de contaminantes presentes no extrato solubilizado dos pavers fabricados com lodo galvânico aos 28 dias de cura

Contaminante	Limite NBR	Ref.	2%	3%	4%	5%	10%
	10004/2004 (mg L <sup>-1</sup> )						
Al	0,20	2,21	3,09	5,67	6,06	6,49	9,63
Ba	0,70	17,12	10,75	2,35	3,48	1,71	7,75
Cd	0,005	0,02	< 0,02	0,02	0,02	< 0,02	< 0,02
Pb	0,01	0,19	0,19	0,22	0,20	0,17	0,18
Cu	2,00	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Cr	0,05	0,07	0,07	< 0,06	< 0,06	< 0,06	0,07
Fe	0,30	< 0,06	0,06	< 0,06	0,06	0,06	0,08
Mn	0,10	0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Hg	0,001	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Ag	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Na	200	21,92	30,62	36,21	42,02	41,42	45,61
Cloro(Cl <sup>-</sup> )	250	n.d	2,17	2,12	13,83	2,97	13,53
Fluoreto(F <sup>-</sup> )	1,50	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Nitrato(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	10,00	6,87	11,16	10,53	12,40	13,21	26,31
Sulfato(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	250	15,00	75,68	n.d	58,11	49,09	64,51

Os valores indicados por < (menor que) estão abaixo do limite de detecção do aparelho utilizado

Os ensaios de solubilização também mostraram que mesmo com o aumento gradual da porcentagem de lodo galvânico incorporado ao concreto dos blocos, as concentrações de cádmio, cobre, manganês, mercúrio e prata permaneceram inalteradas. Para os contaminantes que apresentaram variação na concentração, foi aplicada a análise ANOVA, como mostra a Tabela IV.18.

Tabela IV.18 – Resumo da análise ANOVA para solubilização dos blocos fabricados com lodo galvânico

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média quadrática	F	Pvalor
Al	5	69,9531	13,9906	13,3421	0,00335*
Ba	5	357,3961	71,4792	13,8088	0,003057*
Pb	5	0,003085	0,000617	17,18	0,001694*
Cr	5	0,00026	0,000045	0,1392	0,97647
Fe	5	0,001017	0,000203	0,6061	0,700424
Na	5	769,09	153,82	161,99	0,00000*

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Pvalor < 0,01)

De acordo com a análise de variância, o cromo e o ferro não apresentaram diferenças significativas entre as concentrações do solubilizado nos blocos referência e nos blocos com a presença de resíduo. O bário, o alumínio, o chumbo e o sódio apresentaram significância para o teste (Pvalor < 0,01).

Aplicando o teste de comparação múltipla entre médias (teste de Tukey) para esses metais, foi constatado que a concentração de bário no blocos referência foi superior e significativamente diferente das concentrações encontradas nos blocos com 3%, 4% e 5% de lodo. Observou-se uma correlação inversamente proporcional entre o teor de resíduo e a concentração de bário no solubilizado dos blocos, comprovando que a adição de lodo galvânico ajudou de algum modo na diminuição da solubilização do referido metal.

Para o chumbo, a concentração no bloco referência não apresentou diferenças estatísticas em relação aos demais, porém, o bloco com 3% de resíduo diferiu significativamente dos blocos fabricados com 5% e 10%. As concentrações de alumínio no bloco referência e nos blocos com 10% de lodo também foram estatisticamente diferentes, apresentando tendência de aumento da concentração do metal no solubilizado, conforme aumenta o teor de lodo nos blocos. Isso pode estar relacionado à alta concentração de alumínio presente na matriz desse resíduo. Para o sódio, essa tendência de aumento de concentração também foi verificada. Entretanto, tal fato não representa nenhum tipo de risco quanto a solubilização, uma vez que as concentrações ficaram bem abaixo do limite estabelecido na norma ABNT NBR 10004 (2004), que é de 200 mg L<sup>-1</sup>.

Semelhante à poeira de jateamento, a utilização de lodo galvânico como matéria-prima alternativa na fabricação de pavimentos intertravados não trará problemas de contaminação ambiental. Os resultados de lixiviação e solubilização comprovaram que a presença desse resíduo nos blocos fabricados não alterou significativamente as concentrações dos metais nos extratos lixiviado e solubilizado.

A Tabela IV.19 mostra os valores de pH medidos durante os ensaios de solubilização dos blocos de concreto fabricados com ambos resíduos galvânicos. A importância de se medir o pH do extrato solubilizado se deve à capacidade que o mesmo exerce na solubilidade dos contaminantes.

Tabela IV.19 – Valores de pH do extrato solubilizado dos blocos fabricados com resíduos galvânicos

<i>Teor de substituição</i>	<i>Blocos com poeira de jateamento</i>	<i>Blocos com lodo galvânico</i>
Ref.	12,8	12,8
2%	13,0	12,9
3%	13,1	12,9
4%	12,8	12,8
5%	13,0	12,8
10%	12,8	12,7

Com relação aos valores de pH, os mesmos encontraram-se numa faixa básica que variou de 12,8 a 13,1 e 12,7 a 12,9, para os blocos contendo poeira de jateamento e lodo galvânico, respectivamente. A alcalinidade presente nos extratos solubilizados dos blocos de concreto é proveniente da formação de hidróxidos que ocorre durante as reações de hidratação do cimento. Esses altos valores de pH contribuem diretamente para a diminuição da solubilidade dos contaminantes na matriz estabilizante. O pH elevado do extrato, provavelmente, favoreceu a formação de compostos insolúveis (hidróxidos, óxidos e carbonatos metálicos) que foram incorporados à estrutura do produto final.

Autores como Massandier *et al.*, (1997), Conner (1990) e Lu *et al.*, (1985) afirmam que o pH do extrato solubilizado de determinado material ou resíduo afeta a especiação dos contaminantes, influenciando na precipitação e dissolução dos mesmos. Altos valores de pH (acima de 7,5) são desejáveis para que os contaminantes tenham solubilidade mínima na matriz cimentícia.

#### 4.2.3 Eficiência de retenção de contaminantes na estabilização/solidificação

Com relação à eficiência de retenção dos contaminantes, as Tabelas IV.20 e IV.21 apresentam estimativas da retenção dos metais via lixiviado nas matrizes de cimento dos blocos. Como não houve variação nas concentrações de mercúrio no lixiviado/solubilizado do resíduo bruto e no lixiviado/solubilizado dos blocos contendo poeira de jateamento e lodo galvânico, o mesmo foi excluído do cálculo da eficiência de retenção.

Tabela IV.20 – Eficiência de retenção ( $E_{\text{retenção}} \%$ ) de metais lixiviados na matriz dos blocos fabricados com poeira de jateamento

<i>Elementos</i>	<i>Porcentagem de resíduo</i>				
	<i>2%</i>	<i>3%</i>	<i>4%</i>	<i>5%</i>	<i>10%</i>
<i>Ba</i>	0,00	100,00	100,00	0,00	0,00
<i>Cd</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Pb</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Cr</i>	38,89	38,89	38,89	44,44	50,00
<i>Ag</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

A Tabela IV.20 mostra as eficiências de retenção nos blocos fabricados com poeira de jateamento. Com exceção do bário, foi possível verificar uma alta eficiência de retenção para cádmio, chumbo e prata, ou seja, esses metais presentes no resíduo foram totalmente imobilizados na matriz cimentícia dos blocos. O cromo também apresentou retenção, porém em menor proporção.

O bário foi o único contaminante que não apresentou imobilização nos blocos fabricados com 2%, 5% e 10% de poeira de jateamento. Provavelmente, esse comportamento foi devido à presença desse metal em concentrações elevadas no extrato lixiviado do cimento utilizado na confecção dos blocos de concreto, o que levou a uma saturação mais rápida.

A Tabela IV.21 mostra as eficiências de retenção nos blocos fabricados com lodo galvânico. Por meio dos resultados obtidos constatou-se novamente que o cádmio, o chumbo e a prata presentes no resíduo foram totalmente estabilizados na matriz cimentícia. Bário e cromo não apresentaram retenção.

Tabela IV.21 – Eficiência de retenção ( $E_{\text{retenção}} \%$ ) de metais lixiviados dos blocos fabricados com lodo galvânico

<i>Elementos</i>	<i>Porcentagem de resíduo</i>				
	<i>2%</i>	<i>3%</i>	<i>4%</i>	<i>5%</i>	<i>10%</i>
<i>Ba</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Cd</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Pb</i>	100,00	90,00	100,00	100,00	100,00
<i>Cr</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Ag</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Conner (1990) e Wiles (1987) estudaram o tratamento de resíduos sólidos industriais perigosos com pozolanas, cinzas volantes e cimento, verificando os mecanismos de conversão química e retenção física dos contaminantes. De acordo com os autores a imobilização do íon cádmio ( $\text{Cd}^{2+}$ ) está relacionada à sua precipitação na

matriz cimentícia, reagindo com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , resultando na substituição dos íons  $\text{Cd}^{2+}$  e gerando o  $\text{CdCa(OH)}_4$ . O cromo ( $\text{Cr}^{3+}$ ) pode ser incorporado no interior da matriz, especialmente no interior do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que apresenta a fórmula molecular  $\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , ou ainda na forma de bentorita ( $3\text{CaO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) ou Cr-etringita ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaCrO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), segundo Jain (2008).

Bishop (1986) afirma que a imobilização do chumbo ( $\text{Pb}^{+2}$ ) em cimento deve-se a dois fenômenos: primeiro a precipitação do hidróxido metálico e depois a sua encapsulação na fase C-S-H. De acordo com Yousuf *et al.*(1998), a estabilização da prata em matrizes cimentícias alcalinas ocorre por meio da formação de compostos insolúveis, como  $\text{AgCl}$ ,  $\text{Ag}_2\text{CO}_3$  e  $\text{Ag}_2\text{O}$ .

Os mecanismos de precipitação e encapsulamento supracitados podem ser uma explicação para a diminuição da liberação desses metais no lixiviado dos blocos fabricados com poeira de jateamento. Os resultados indicaram claramente que esses metais estão sujeitos a um mecanismo de imobilização decorrente do processo de tratamento utilizado.

A eficiência de retenção a partir da análise do solubilizado para os blocos fabricados com poeira de jateamento e lodo galvânico são mostradas nas Tabelas IV.22 e IV.23, respectivamente.

Tabela IV.22 - Eficiência de retenção ( $E_{\text{retenção}} \%$ ) de metais solubilizados na matriz dos blocos fabricados com poeira de jateamento

Elementos	Percentagem de resíduo				
	2%	3%	4%	5%	10%
<i>Al</i>	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
<i>Ba</i>	54,50	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Pb</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Cu</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Cr</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	92,31
<i>Na</i>	96,55	94,33	92,03	92,26	90,60

É possível afirmar que os elementos bário, chumbo, cobre, cromo e sódio, presentes na poeira de jateamento, mostraram grande potencial de estabilização/solidificação no cimento, apresentando eficiências de retenção de praticamente 100% quando se avalia o solubilizado. Somente o alumínio apresentou baixos indícios de imobilização na maior parte dos blocos de concreto.

As eficiências de retenção para o cádmio, ferro, manganês e prata não foram calculadas, pois não houve diferença entre as concentrações dos respectivos metais no solubilizado do resíduo bruto e no solubilizado dos blocos de concreto fabricados com o mesmo.

Para o lodo galvânico, a efetividade de imobilização dos metais a partir da análise do solubilizado (Tabela IV.23) mostrou-se semelhante a dos metais presentes na poeira de jateamento, além de apresentar também 100% de eficiências de retenção para o cádmio, ferro e manganês.

Tabela IV.23 - Eficiência de retenção ( $E_{\text{retenção}} \%$ ) de metais solubilizados na matriz dos blocos fabricados com lodo galvânico

Elementos	Substituições				
	2%	3%	4%	5%	10%
<i>Al</i>	-	-	-	-	-
<i>Ba</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Cd</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Pb</i>	100,00	90,63	96,88	100,00	100,00
<i>Cu</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Cr</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Fe</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	98,66
<i>Mn</i>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Na</i>	96,55	94,33	92,03	92,26	90,60

De acordo com Navarro-Blasco *et al.* (2013), o mecanismo de imobilização do cobre em matrizes cimentícias está relacionado à formação do precipitado  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  em meio alcalino. Conner (1990) cita que um possível mecanismo para a estabilização dos cátions de bário ( $\text{Ba}^{+2}$ ) seria sua conversão para a forma de carbonatos e sulfatos insolúveis ( $\text{BaCO}_3$  e  $\text{BaSO}_4$ ) devido ao alto pH no meio cimentício, com posterior precipitação de tais compostos na superfície das partículas de cimento. Ferro e manganês também precipitam facilmente em ambientes alcalinos na forma de hidróxidos. Com relação ao sódio não foram encontrados estudos que evidenciassem qual o tipo de mecanismo (físico ou químico) pode ser responsável por sua imobilização em matrizes cimentícias.

Como exposto anteriormente, somente o alumínio não apresentou efetividade de retenção por estabilização/solidificação quando se avaliou o extrato solubilizado dos blocos de concreto fabricados, o que pode estar vinculado a uma condição atípica de precipitação que alguns metais apresentam.

De acordo com Bradley e Hanna (1994), em pH alcalino ( $\text{pH} > 7$ ) os cátions  $\text{Al}^{+3}$  precipitam na forma de hidróxidos insolúveis  $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ . Porém, para valores de pH muito elevados ( $\text{pH} \geq 11$ ), como no caso das matrizes de cimento, o  $[\text{Al}(\text{OH})_3]$  volta a se solubilizar sob a forma de  $[\text{Al}(\text{OH})_4^-]$  e íons oxidados, normalmente ânions ( $\text{AlO}^{2-}$ ), inviabilizando a precipitação do alumínio, ocasionando, assim, sua solubilização.

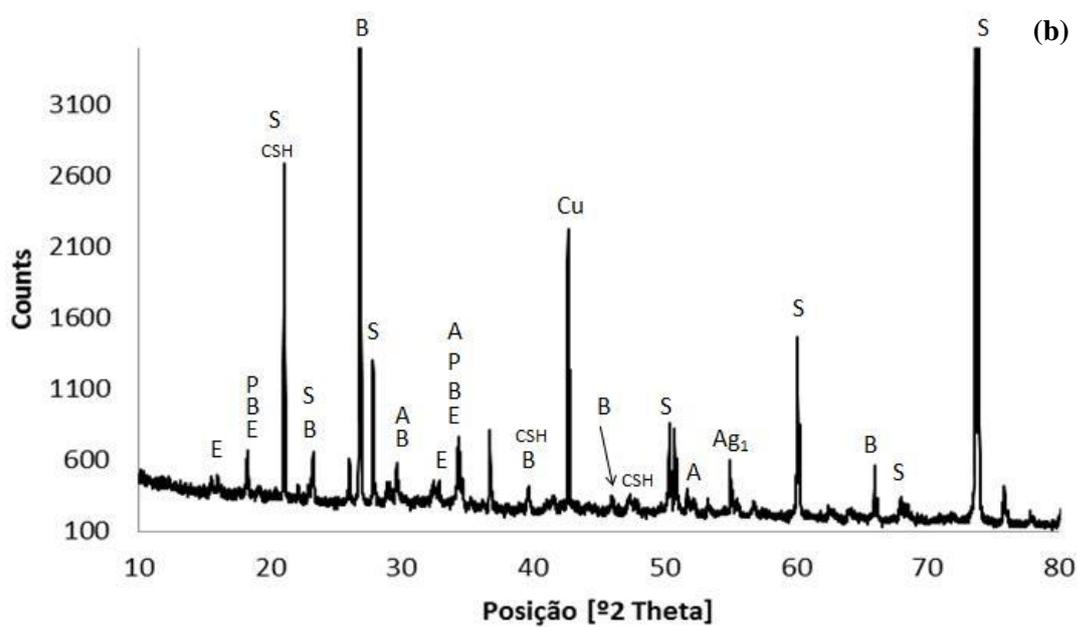
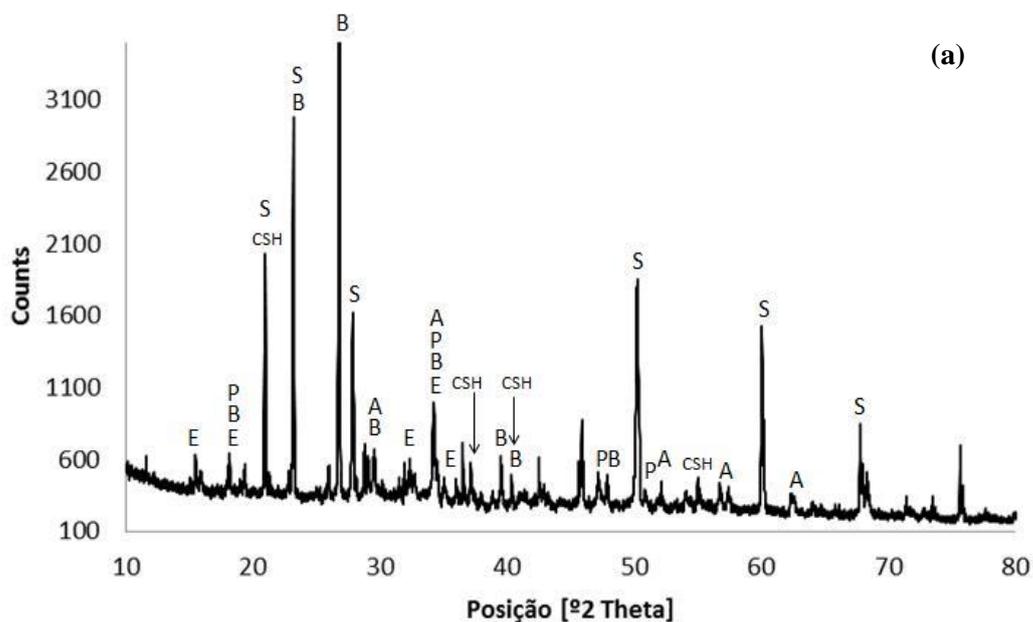
#### **4.2.4 Difração de raios-x e Fluorescência de raios-x**

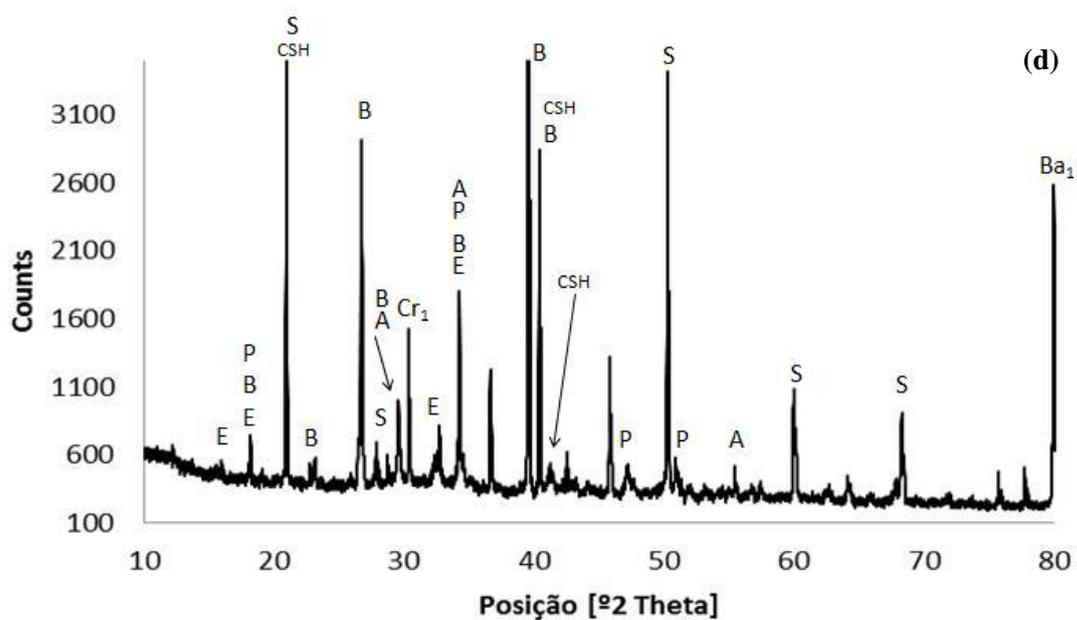
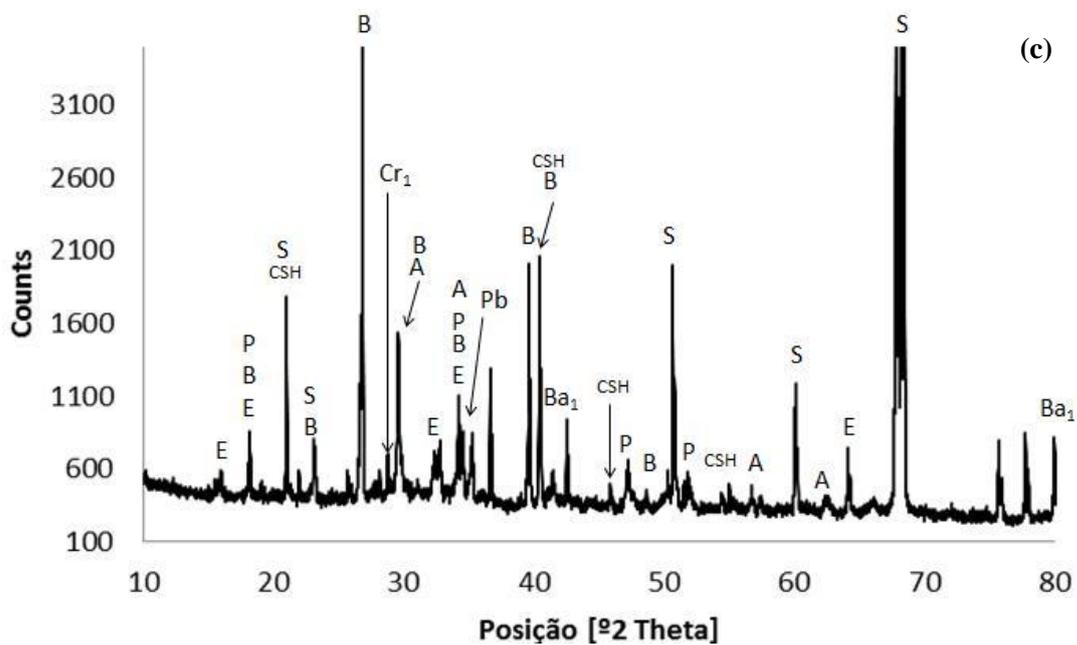
As análises de difração de raios-x (DRX) tiveram como objetivo identificar as fases cristalinas presentes nas amostras solidificadas e estabilizadas dos pavimentos intertravados fabricados com e sem resíduos galvânicos. Além disso, esta análise possibilita o conhecimento dos produtos complexos da hidratação dos resíduos de galvanoplastia, além do fornecimento de informações importantes no que diz respeito às alterações ocorridas na pasta de cimento hidratada com a adição desses rejeitos.

A Figura IV.10 apresenta os resultados da análise de DRX das amostras dos blocos de concreto incorporados com poeira de jateamento aos 28 dias de hidratação. Os principais picos das amostras solidificadas foram identificados, e os compostos cristalinos estão relacionados na Tabela IV.24.

Tabela IV.24 – Compostos cristalinos avaliados para as amostras solidificadas dos blocos fabricados com poeira de jateamento

<i>Nomenclatura</i>	<i>Compostos</i>
A	Alita – silicato tricálcico (C <sub>3</sub> S)
B	Belita – silicato dicálcico (C <sub>2</sub> S)
S	Sílica – (SiO <sub>2</sub> )
CSH	Silicato dicálcico hidratado - tobermorita
E	Etringita – Alumino sulfato de cálcio hidratado
P	Portlandita – hidróxido de cálcio (Ca(OH) <sub>2</sub> )
Cu	Sulfato de cobre (CuSO <sub>4</sub> )
Ag <sub>1</sub>	Óxido de prata (Ag <sub>2</sub> O)
Ag <sub>2</sub>	Cloreto de prata (AgCl)
Ag <sub>3</sub>	Carbonato de prata (Ag <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
Ba <sub>1</sub>	Sulfato de bário (BaSO <sub>4</sub> )
Ba <sub>2</sub>	Carbonato de bário (BaCO <sub>3</sub> )
Ba <sub>3</sub>	Óxido de bário (BaO)
Pb	Chumbo incorporado ao C-S-H (Ca <sub>4</sub> .6OPb.322Si.6O.16H <sub>2</sub> O)
Cr <sub>1</sub>	Cromo incorporado ao C-S-H (2CaO.SiO <sub>2</sub> .Cr.2H <sub>2</sub> O)
Cr <sub>2</sub>	(Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .SiO <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O)





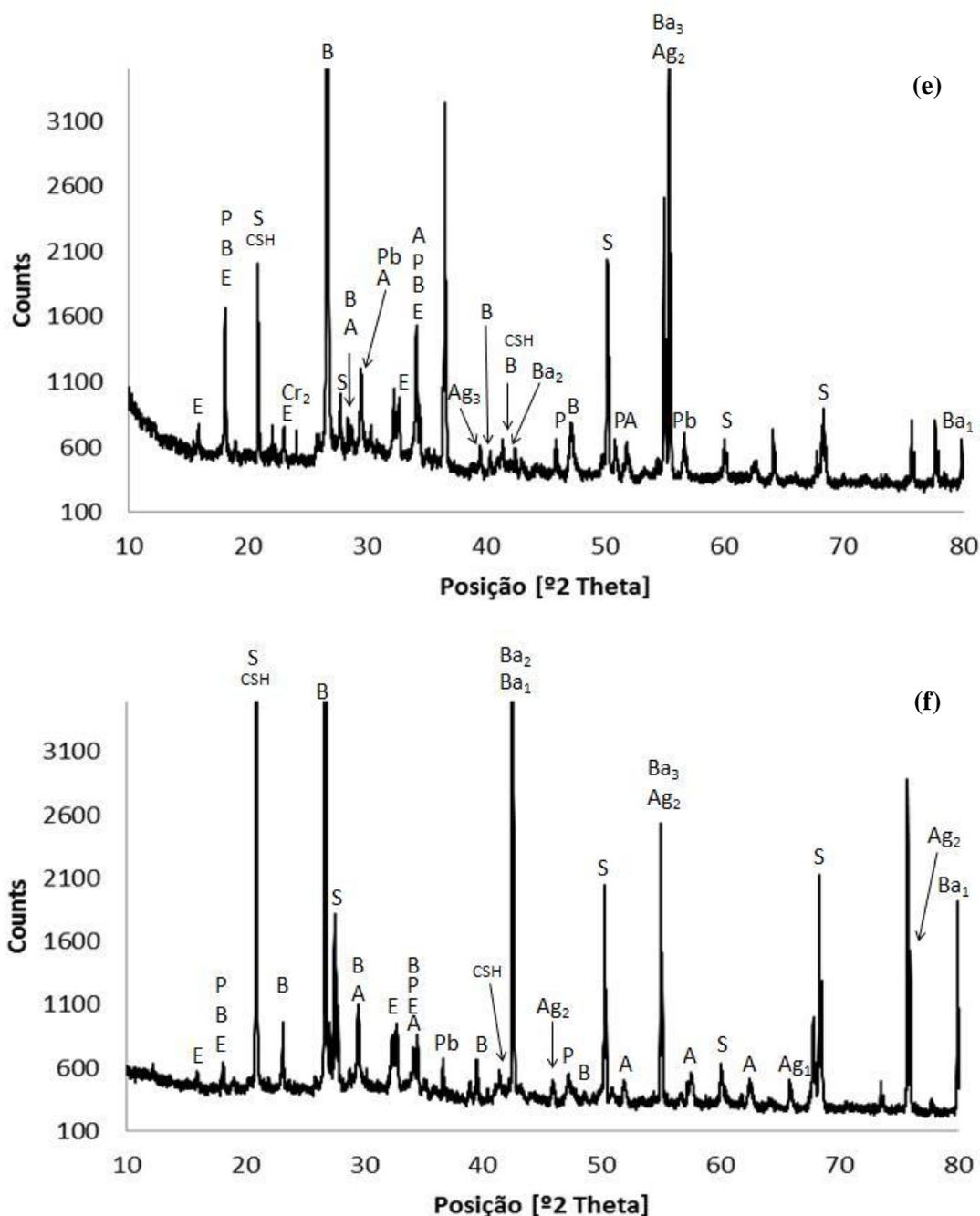


Figura IV. 10 - Difratomogramas de raios-x dos blocos fabricados com poeira de jateamento, (a) referência, (b) 2%, (c) 3%, (d) 4%, (e) 5%, (f) 10%

Por meio da Figura IV.10 (a), que apresenta o difratograma de amostras dos blocos de concreto fabricados sem a adição de resíduo (ou referência), identificam-se os picos referentes às principais fases do cimento hidratado, tais como, etringita (trissulfoaluminato de cálcio hidratado), portlandita (hidróxido de cálcio) e tobermorita (silicato de cálcio hidratado). Detectaram-se picos de compostos presentes no cimento

anidro, como alita ( $C_3S$ ), belita ( $C_2S$ ) e sílica ( $SiO_2$ ), presentes também na areia utilizada.

Outros autores detectaram para a mesma idade de hidratação, 28 dias, outros compostos para diferentes tipos de cimento e/ou fabricantes: aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ), na pasta de cimento CP V – ARI (FRANCO, 2011), silicato de alumínio e cálcio e silicato de alumínio e sódio, na pasta de cimento CP II (PINTO, 2005), hidróxido de magnésio e alumínio hidratado, na pasta de cimento CP II F-32 (ADERNE, 2005).

Para as amostras dos blocos de concreto com adição de poeira de jateamento (Figuras IV.10 (b), (c), (d), (e) e (f)), em geral, foi possível observar uma elevação na intensidade dos picos de difração relativos à sílica, muito provavelmente devido a sílica presente no resíduo. Foi constatado um ligeiro aumento de intensidade dos picos de difração correspondentes à alita ( $C_3S$ ) e belita ( $C_2S$ ), bem como o aparecimento de picos adicionais de alita. O aumento de intensidade dos picos referentes a compostos do cimento anidro pode ser uma constatação da ocorrência de retardo na hidratação do cimento ocorrida no período.

As raias de difração correspondentes a portlandita [ $Ca(OH)_2$ ], silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e etringita não apresentaram mudanças significativas.

Utilizou-se o difratograma da amostra dos blocos referência (Figura IV.10 a), como parâmetro de comparação para identificar novas fases cristalinas nas amostras com adição de poeira de jateamento. Nas amostras com 2%, 3%, 4%, 5% e 10 % desse resíduo detectaram-se todos os compostos identificados no difratograma referência, além de picos adicionais devido a adição do rejeito galvânico: sulfato de cobre ( $CuSO_4$ ), óxido de prata ( $Ag_2O$ ), cloreto de prata ( $AgCl$ ), carbonato de prata ( $Ag_2CO_3$ ), sulfato de bário ( $BaSO_4$ ), óxido de bário ( $BaO$ ), carbonato de bário ( $BaCO_3$ ) e ainda compostos com cromo ( $2CaO.SiO_2.Cr.2H_2O$  e  $Cr_2O_3.SiO_2.H_2O$ ) e chumbo ( $4Ca.6OPb.322Si.6O.16H_2O$ ), além de outros picos não identificados. Tais compostos foram encontrados por Conner (1990), Wiles (1987) e Yousuf *et al.*, (1998) em seus estudos sobre estabilização/solidificação de metais em matrizes cimentícias.

É possível observar que quando se aumenta a quantidade de resíduo na formulação do concreto, aumenta-se o aparecimento e intensidade desses picos. Esse comportamento sugere a ocorrência de alterações nos produtos de hidratação do

cimento devido à adição de resíduo, bem como indica a presença de mecanismos de estabilização química desses metais componentes da poeira de jateamento.

Compostos com a presença de cádmio, ferro, manganês e sódio não foram detectados pela análise de DRX por estarem possivelmente em forma não cristalina ou em teor não detectável pela análise. De acordo com Ortego *et al.* (1989), e Melchert (2012), as fases associadas com os metais pesados no sistema de estabilização/solidificação em matriz de cimento são geralmente pouco cristalinas, pois os metais podem ser fisicamente encapsulados pelo C-S-H, sendo a caracterização bastante difícil.

A Figura IV.11 apresenta a análise de difração de raios-x dos blocos de concreto contendo lodo de galvanoplastia. Os principais compostos cristalinos detectados aos 28 dias de cura estão listados na Tabela IV.25.

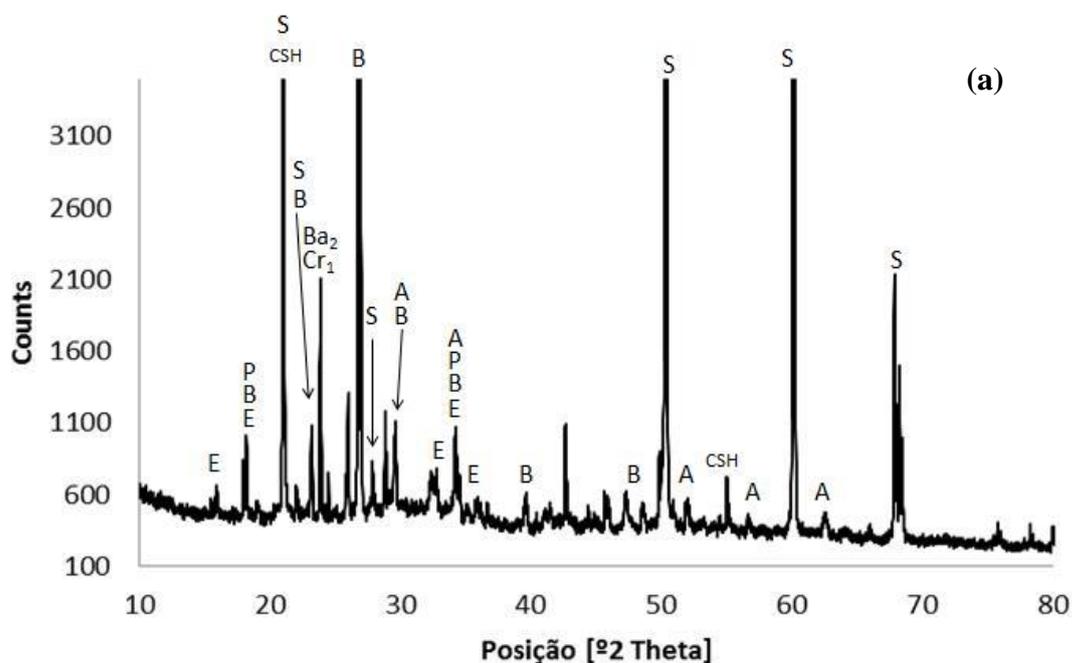
Tabela IV.25 – Compostos cristalinos avaliados para as amostras solidificadas dos blocos fabricados com lodo galvânico

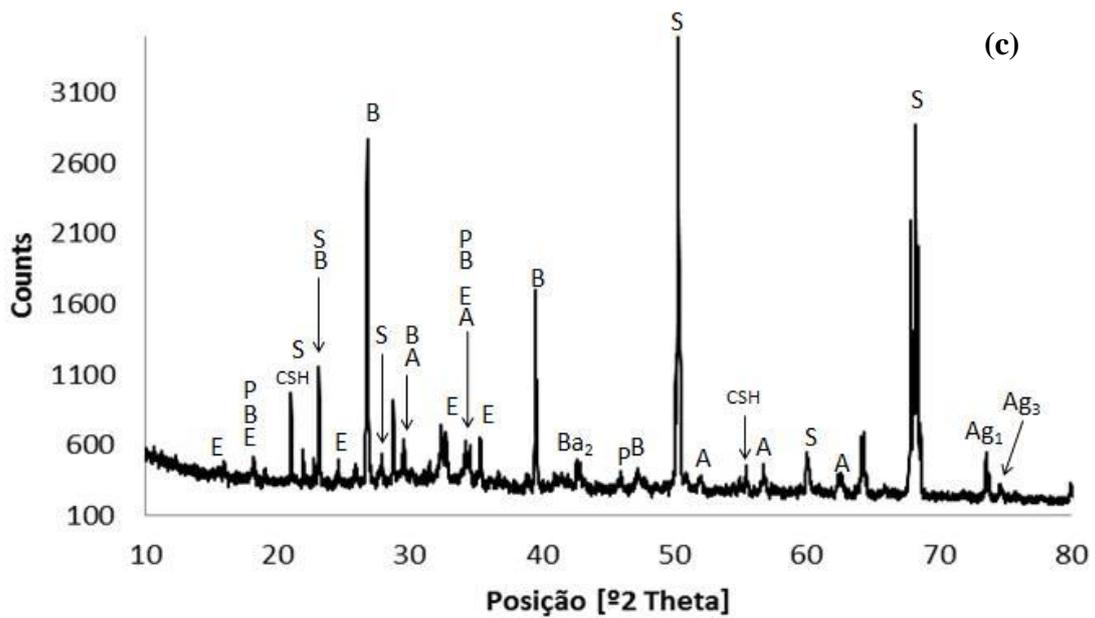
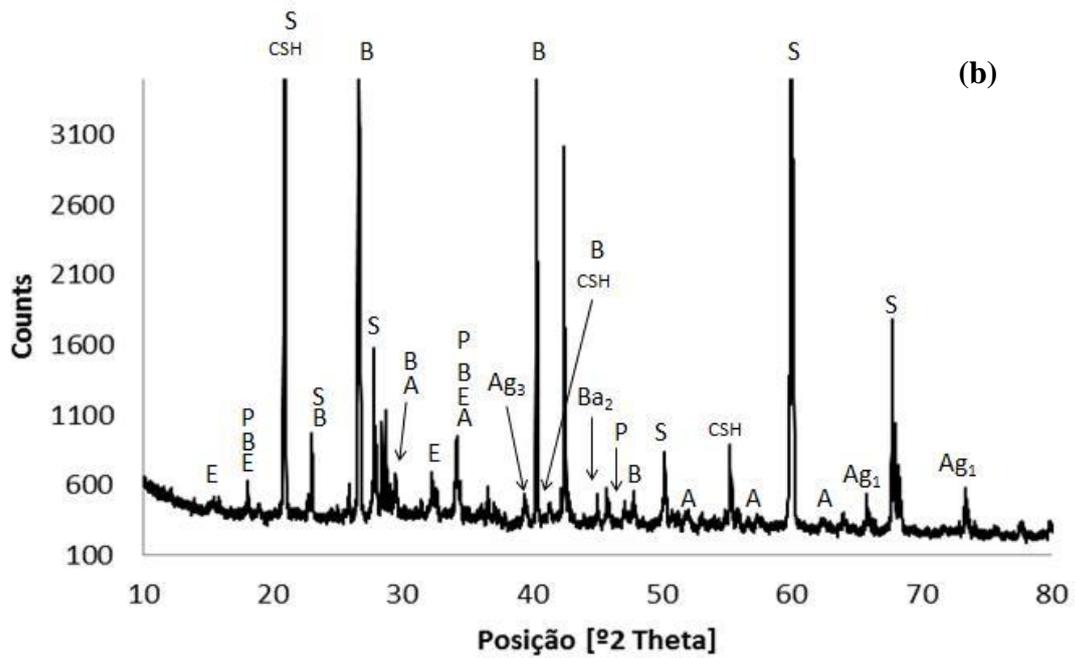
<i>Nomenclatura</i>	<i>Compostos</i>
A	Alita – silicato tricálcico (C <sub>3</sub> S)
B	Belita – silicato dicálcico (C <sub>2</sub> S)
S	Sílica – (SiO <sub>2</sub> )
CSH	Silicato dicálcico hidratado - tobermorita
E	Etringita – Alumino sulfato de cálcio hidratado
P	Portlandita – hidróxido de cálcio (Ca(OH) <sub>2</sub> )
Ag <sub>1</sub>	Óxido de prata (Ag <sub>2</sub> O)
Ag <sub>2</sub>	Cloreto de prata (AgCl)
Ag <sub>3</sub>	Carbonato de prata (Ag <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
Ba <sub>1</sub>	Sulfato de bário (BaSO <sub>4</sub> )
Ba <sub>2</sub>	Carbonato de bário (BaCO <sub>3</sub> )
Cr <sub>1</sub>	Cromo incorporado ao C-S-H (2CaO.SiO <sub>2</sub> .Cr.2H <sub>2</sub> O)

Utilizando novamente a curva referência (Figura IV.10 a) como parâmetro de comparação, nas amostras dos blocos contendo lodo de galvanoplastia (Figuras IV.11 a, b, c, d, e) detectou-se todos os compostos identificados na amostra referência com uma ligeira diminuição na quantidade e intensidade dos picos de C-S-H das amostras com até 4% de resíduo. O resultado evidencia o retardamento da hidratação do cimento. Para

as demais estruturas cristalinas (etringita, portlandita, alita, belita e sílica) a análise de DRX não foi muito esclarecedora.

Assim como ocorreu para a poeira de jateamento, a presença de lodo galvânico rico em metais provocou alterações nos produtos formados na hidratação do cimento. Nas amostras solidificadas contendo lodo galvânico pode-se observar a detecção de compostos cristalinos adicionais tais como, óxido de prata ( $\text{Ag}_2\text{O}$ ), cloreto de prata ( $\text{AgCl}$ ), carbonato de prata ( $\text{Ag}_2\text{CO}_3$ ), sulfato e carbonato de bário ( $\text{BaSO}_4$  e  $\text{BaCO}_3$ , respectivamente) e um composto contendo cromo ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{Cr}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Fases cristalinas contendo outros metais presentes na composição do lodo, tais como cobre, chumbo, ferro, manganês, cádmio e sódio não foram detectadas.







A Tabela IV.26 e Tabela IV.27 apresentam os teores (% em massa) dos óxidos obtidos na análise de FRX para amostras dos pavimentos com incorporação de poeira de jateamento e lodo galvânico, respectivamente.

Tabela IV.26 – Porcentagem em massa dos compostos na composição dos blocos de concreto fabricados com poeira de jateamento

Compostos	Substituição					
	Ref.	2%	3%	4%	5%	10%
<i>MgO</i>	n.d	n.d	0,43	n.d	n.d	n.d
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	1,09	1,30	1,50	1,72	1,75	1,31
<i>SiO<sub>2</sub></i>	11,19	16,46	18,25	32,56	17,21	17,55
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	0,17	0,21	n.d	0,23	n.d	0,21
<i>SO<sub>3</sub></i>	26,08	15,25	14,25	16,42	4,66	6,22
<i>K<sub>2</sub>O</i>	0,74	0,80	0,78	0,71	0,83	0,65
<i>CaO</i>	53,59	56,14	55,35	55,12	61,59	62,27
<i>TiO<sub>2</sub></i>	0,85	0,84	0,86	1,59	1,83	1,23
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	5,83	8,30	9,29	9,95	11,37	9,77
<i>CuO</i>	n.d	n.d	0,11	0,12	0,14	0,24
<i>Cl</i>	n.d	n.d	n.d	n.d	0,01	n.d
<i>MnO</i>	0,13	0,19	0,17	0,22	0,23	n.d
<i>SrO</i>	0,32	0,39	0,37	0,36	0,38	0,46
<i>CdO</i>	n.d	0,26	0,35	n.d	n.d	n.d
<i>Ag<sub>2</sub>O</i>	n.d	n.d	0,32	n.d	n.d	n.d
<i>ZnO</i>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0,11

n.d – não detectado pelo equipamento

Os resultados apresentados pela Tabela IV.26 permitem afirmar que não ocorreram, na idade de 28 dias de cura, alterações significativas dos elementos químicos do concreto quando da incorporação de poeira de jateamento. Porém, é possível observar um aumento no teor de sílica ( $SiO_2$ ) em comparação com a amostra referência, devido à presença de grandes porcentagens desse óxido na composição do resíduo. Um aumento gradativo no teor de óxido de ferro III ( $Fe_2O_3$ ) foi observado na composição dos pavimentos.

Outro aspecto que se destacou com relação à adição do resíduo, foi a queda nos teores de anidrido sulfúrico ( $SO_3$ ) presentes no concreto, sugerindo a ocorrência do aumento do consumo de  $SO_3$  devido à presença de poeira de jateamento.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a presença de anidrido sulfúrico no cimento Portland comum tem sua origem relacionada à presença de sulfato de cálcio, em uma das muitas formas possíveis (gipsita –  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , gesso de Paris –  $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$  ou

anidrita –  $\text{CaSO}_4$ ), adicionado ao clínquer durante a moagem, com o objetivo de retardar a tendência à pega rápida do clínquer Portland moído. Ainda, de acordo com os respectivos autores, nas reações de hidratação do cimento o consumo de sulfato de cálcio se dá por meio da reação com aluminatos de cálcio hidratados para a formação de etringita. Entretanto, não é possível confirmar a ocorrência de tais reações, pois pelas análises de difração de raios-x, apresentadas anteriormente não foram detectados aumentos nas intensidades dos picos de etringita nas amostras contendo esse resíduo galvânico.

Alguns óxidos metálicos, tais como  $\text{CuO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{SrO}$  e  $\text{CdO}$  também foram detectados em baixos teores nas matrizes dos blocos fabricados.

Tabela IV.27 – Porcentagem em massa dos compostos na composição dos blocos de concreto fabricados com lodo galvânico

<i>Compostos</i>	<i>Porcentagem de resíduo</i>					
	<i>Ref.</i>	<i>2%</i>	<i>3%</i>	<i>4%</i>	<i>5%</i>	<i>10%</i>
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1,09	1,36	1,47	1,25	1,34	1,35
$\text{SiO}_2$	11,19	12,20	13,53	12,85	12,44	9,87
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,17	0,96	1,34	1,68	2,49	4,53
$\text{SO}_3$	26,08	16,17	15,72	14,83	14,31	10,87
$\text{K}_2\text{O}$	0,74	0,88	0,92	1,03	1,23	1,37
$\text{CaO}$	53,59	55,96	55,69	56,23	54,11	53,45
$\text{TiO}_2$	0,85	1,04	1,02	0,88	0,84	0,89
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5,83	10,35	9,16	9,51	11,83	15,25
$\text{Cl}$	n.d	0,02	n.d	n.d	0,02	n.d
$\text{MnO}$	0,13	n.d	0,20	n.d	n.d	0,18
$\text{SrO}$	0,32	0,43	0,36	0,38	0,29	0,38
$\text{CdO}$	n.d	n.d	n.d	0,50	n.d	n.d
$\text{Ag}_2\text{O}$	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0,22
$\text{ZnO}$	n.d	0,65	0,61	0,87	1,10	2,53

n.d – não detectado pelo equipamento

Para a composição dos concretos contendo lodo galvânico (Tabela IV.27) as alterações nos teores dos compostos, se comparados com a amostra referência não foram significativas. Contudo, como esse tipo de resíduo mostrou-se rico em  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{ZnO}$ , um aumento gradativo no teor desses compostos nas matrizes solidificadas pôde ser observada.

Bem como ocorreu com a poeira de jateamento, o acréscimo de lodo galvânico acarretou em um decréscimo nas porcentagens de anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ) presentes na

composição dos concretos, sugerindo, novamente, aumento do consumo de  $\text{SO}_3$  na presença do resíduo galvânico.

#### 4.2.5 Resistência à compressão

A Figura IV.12 apresenta os valores médios de resistência à compressão obtidos para os blocos de concreto para pavimentação fabricados com substituição parcial do agregado miúdo por poeira de jateamento. A Tabela IV.28 mostra a análise ANOVA dos resultados de resistência à compressão obtidos aos 28 dias de cura.

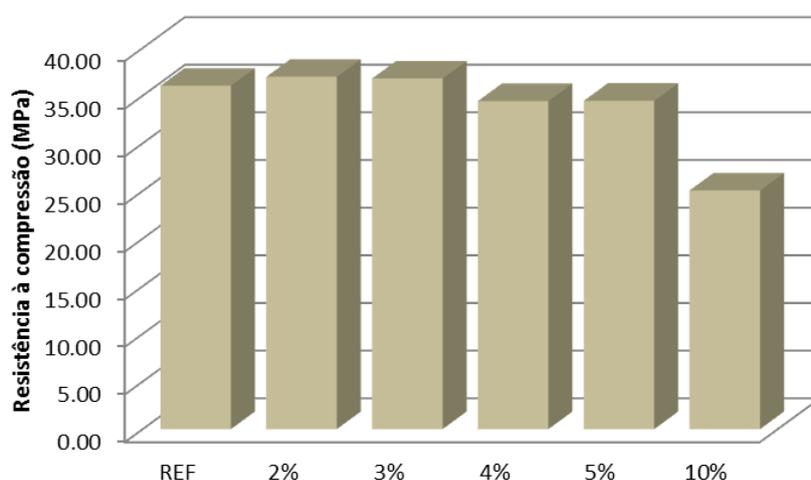


Figura IV.12 – Resistência média à compressão aos 28 dias de cura dos blocos fabricados com poeira de jateamento

Tabela IV.28 – Análise ANOVA para a resistência à compressão dos blocos fabricados com poeira de jateamento

<i>Fonte de variação</i>	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Soma dos quadrados</i>	<i>Média quadrática</i>	<i>F</i>	<i>Pvalor</i>
<i>Tratamentos</i>	5	607,25	121,45	8,646	0,000*
<i>Erro residual</i>	30	421,42	14,05		
<i>Total</i>	35	1028,67			

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Pvalor < 0,01)

Os resultados mostraram que os blocos de concreto referência alcançaram uma média de 36,00 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de cura. Estatisticamente, o resultado da análise ANOVA mostrou que houve significância entre os seis tratamentos. Como o Pvalor apresentado na Tabela IV.28 foi < (menor) do que 0,01; é

válido afirmar que as médias de resistência à compressão são diferentes entre si ao nível de 1% de probabilidade, ou seja, pelo menos uma média é diferente entre si com um limite de confiança de 99%.

Para saber quais médias são significativamente diferentes entre si, foi aplicado o teste de Tukey. A Tabela IV.29 apresenta os valores médios de resistência à compressão para os blocos referência e para os blocos fabricados com 2%, 3%, 4%, 5% e 10% de poeira de jateamento, bem como o teste de Tukey, ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela IV.29 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos blocos fabricados com poeira de jateamento

<i>Tratamento</i>	<i>Média (MPa)</i>
<i>Referência</i>	36,03 a
2%	36,97 a
3%	36,79 a
4%	34,42 a
5%	34,46 a
10%	25,05 b

Notas: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 1% de probabilidade pelo Teste de Tukey

É possível observar que não houve diferenças significativas entre os valores médios de resistência à compressão dos blocos referência e àqueles dos blocos fabricados com 2% a 5% de poeira de jateamento. Porém, a média de resistência dos blocos fabricados com 10% de resíduo mostrou-se inferior e significativamente diferente das demais num limite de confiança de 99%. Blocos fabricados com teores de 10% de poeira de jateamento apresentaram uma redução na resistência de aproximadamente 30,5% em relação ao referência.

Esses resultados indicam a possibilidade de utilização de até 5% de poeira de jateamento na fabricação de blocos de concreto para pavimentação sem perdas significativas da resistência à compressão.

Os resultados obtidos também mostraram uma tendência de queda da resistência dos blocos associado ao acréscimo de poeira de jateamento. Essa tendência foi observada por Topçu e Canbaz (2004), Park *et al.*, (2004) e Ozkan e Yuksel (2008) que estudaram a utilização de resíduos de vidro em substituição ao cimento na fabricação de concretos. Os autores atribuíram esse fenômeno a uma alteração nos produtos da hidratação do cimento na presença de resíduos vítreos. Além disso, a presença de metais pesados na composição da poeira de jateamento também pode ter contribuído para a diminuição da resistência mecânica das peças. De acordo com Benson *et al.*, (1986),

Cioffi *et al.*, (2002) e Zain *et al.*, (2004), a presença de metais pesados provoca um retardamento na hidratação do cimento devido a precipitação dos metais nas superfícies dos grãos de cimento, tendo como consequência a diminuição da resistência.

A Figura IV.13 e a Tabela IV.30 apresentam os valores médios de resistência à compressão para os blocos fabricados com lodo galvânico e a análise ANOVA das médias dos resultados, respectivamente.

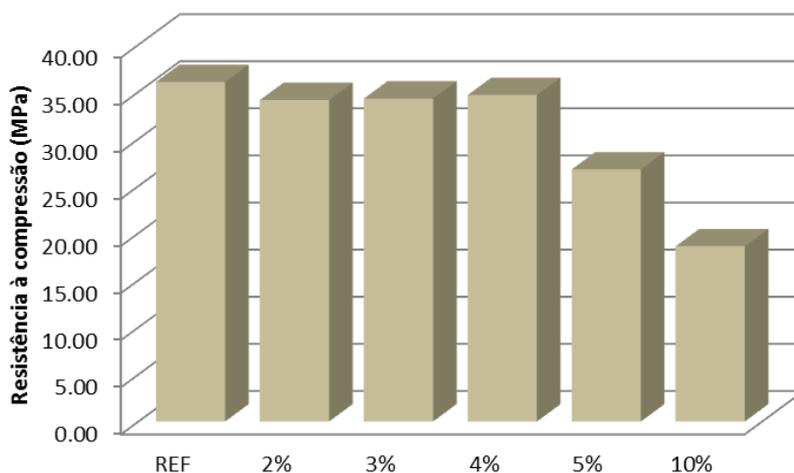


Figura IV.13 – Resistência à compressão aos 28 dias de cura dos blocos fabricados com lodo galvânico

Tabela IV.30 – Análise ANOVA para a resistência à compressão dos blocos fabricados com lodo galvânico

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média quadrática	F	Pvalor
Tratamentos	5	1382,13	276,42	12,466	0,000*
Erro residual	30	665,21	22,17		
Total	35	2047,34			

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Pvalor < 0,01)

Por meio da análise de variância (ANOVA) foi possível observar que existem diferenças significativas entre as médias de resistência à compressão ao nível de 1% de probabilidade, pois o Pvalor mostrou-se < (menor) que  $\alpha = 0,01$ .

Por meio da aplicação do teste de Turkey (Tabela IV.31), que faz a comparação entre as médias dos tratamentos, verifica-se que os valores médios da resistência à compressão dos blocos com 2%, 3% e 4% de lodo galvânico apresentaram valores similares entre si e em relação à média dos blocos referência, com um intervalo de confiança de 99%. Os blocos com 5% e 10% de lodo galvânico apresentaram médias

inferiores e significativamente diferentes das demais, porém estatisticamente iguais entre si.

Tabela IV.31 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos blocos fabricados com lodo galvânico

<i>Tratamento</i>	<i>Média (MPa)</i>
Referência	36,03 a
2%	34,12 a
3%	34,28 a
4%	34,65 a
5%	26,76 b
10%	18,60 b

Notas: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 1% de probabilidade pelo Teste de Tukey

Esses resultados indicam que a substituição de até 4% de agregado miúdo por lodo galvânico não prejudicará as características de resistência mecânica dos blocos de concreto fabricados. A tendência de diminuição da resistência com o aumento da adição de resíduo também foi verificada nos blocos fabricados com lodo galvânico, o que também pode estar relacionado à presença de metais pesados na sua composição.

A Tabela IV.32 mostra um resumo dos valores médios obtidos para a resistência à compressão ( $F_p$ ) dos blocos fabricados com os resíduos, bem como a resistência média característica ( $F_{pk}$ ) obtida para os mesmos e calculada de acordo com a norma ABNT NBR 9781 (2013).

Tabela IV.32 – Resistência à compressão e resistência característica à compressão dos blocos de concreto fabricados com resíduos galvânicos

<i>Teor de substituição</i>	<i>Poeira de jateamento</i>		<i>Lodo galvânico</i>	
	$F_p$ (MPa)	$F_{pk}$ (MPa)	$F_p$ (MPa)	$F_{pk}$ (MPa)
Referência	36,03	33,60	36,03	33,60
2%	36,97	35,74	34,12	30,36
3%	36,79	32,64	34,27	29,09
4%	34,43	31,63	34,66	31,59
5%	34,45	31,20	26,75	23,32
10%	25,05	19,72	18,59	11,92

Segundo a norma supracitada, a resistência mínima característica exigida para os blocos de concreto a serem utilizados na pavimentação de vias para tráfego de veículos leves deve ser  $\geq$  (maior ou igual) a 35 MPa. Por meio da Tabela IV.32 verifica-se que a resistência característica dos blocos fabricados com teores de até 5% de poeira de jateamento e 4% de lodo galvânico apresentaram valores muito próximos aos estipulados pela normativa aos 28 dias de cura, esses valores de resistência ainda tendem a aumentar com o aumento do tempo de cura dos blocos.

Esses resultados vem ratificar o exposto anteriormente de que, com relação a resistência mecânica, 5% de poeira de jateamento e 4% de lodo galvânico são os teores ideais de substituição de agregados miúdos na fabricação de concreto para blocos intertravados.

#### 4.2.6 Absorção de água

A absorção de água é outra característica de grande importância na qualidade dos blocos de concreto. A Figura IV.14 apresenta os valores médios obtidos nos ensaios de absorção de água dos blocos de concreto fabricados com poeira de jateamento.

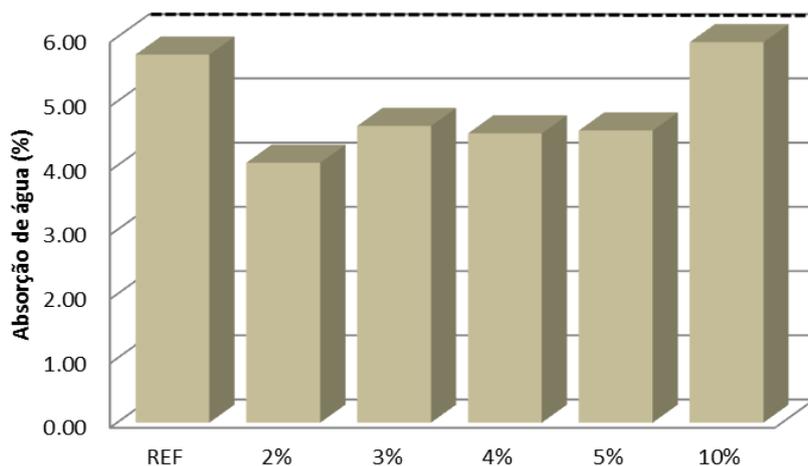


Figura IV.14 – Absorção de água, aos 28 dias de cura, dos blocos fabricados com poeira de jateamento

No geral, pode-se observar que os valores de absorção de água dos blocos mantiveram-se dentro dos percentuais máximos exigidos pela norma ABNT NBR 9781 (2013) (representado no gráfico pela linha tracejada), que é de 6%. A Tabela IV.33 apresenta a análise ANOVA dos resultados médios de absorção de água dos blocos aos 28 dias de cura.

Tabela IV.33 – Tabela ANOVA para a absorção de água dos blocos fabricados com poeira de jateamento

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média quadrática	F	Pvalor
Tratamentos	5	5,6378	1,1276	5,301	0,033*
Erro residual	6	1,2763	0,2127		
Total	11	6,9141			

\*Sem significância ao nível de 1% de probabilidade (Pvalor > 0,01)

Aplicando a análise de variância, verifica-se na Tabela IV.33 que não há diferenças significativas ao nível de 1% de probabilidade entre os tratamento (Pvalor > 0,01), ou seja, existe uma forte evidência de que a substituição parcial dos agregados miúdos por poeira de jateamento não influenciou significativamente os valores de absorção de água dos blocos fabricados.

A Figura IV.15 mostra os resultados médios de absorção de água para os blocos referência, bem como para os blocos de concreto fabricados com lodo de galvanoplastia. A Tabela IV.34 apresenta a análise de variância dos resultados obtidos.

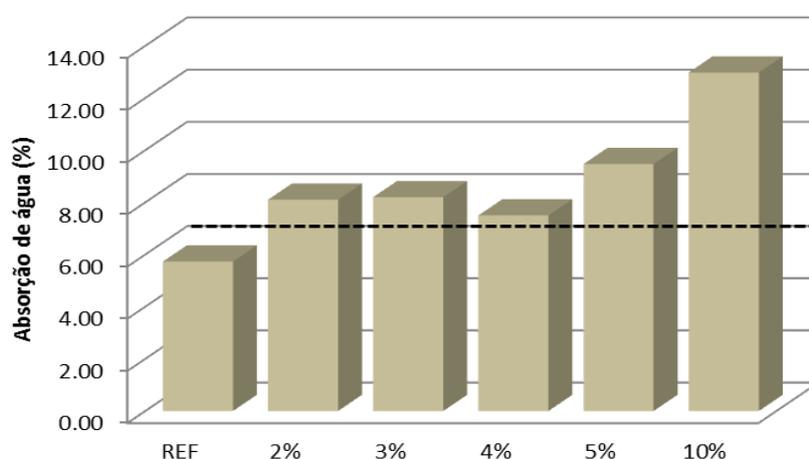


Figura IV.15 – Absorção de água, aos 28 dias de cura, dos blocos fabricados com lodo galvânico

Tabela IV.34 – Análise ANOVA para a absorção de água dos blocos fabricados com lodo galvânico

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média quadrática	F	Pvalor
Tratamentos	5	59,5604	11,9121	9,4049	0,0083*
Erro residual	6	7,5995	1,2666		
Total	11	67,1599			

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Pvalor < 0,01)

Os resultados apresentados na Tabela IV.34 indicam que há diferenças significativas ao nível de 1% de probabilidade entre os tratamentos. O Pvalor foi < (menor) que  $\alpha$  ( $0,0083 < 0,01$ ) indicando que é válido afirmar que as médias são diferentes entre si.

Para confirmar essa indicação foi realizado o teste de Tukey de comparação múltipla das médias (Tabela IV.35). O resultado do teste de Tukey mostrou que as médias que realmente diferem estatisticamente entre si com 99% de confiança são as médias de absorção de água dos blocos referência e dos blocos fabricados com 10% de lodo galvânico. Este último apresentando valores de absorção superiores aos demais. Os tratamentos com 2%, 3%, 4% e 5% apresentaram-se com médias semelhantes tanto ao referência, quanto aos blocos com teor de 10% de resíduo.

Tabela IV.35 – Teste de Tukey para a absorção de água dos blocos fabricados com lodo galvânico

<i>Tratamento</i>	<i>Média (MPa)</i>
Referência	5,73 a
2%	8,11 a b
3%	8,20 a b
4%	7,50 a b
5%	9,47 a b
10%	12,98 b

Notas: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 1% de probabilidade pelo Teste de Tukey

Observa-se por meio da Figura IV.15, que ao contrário do que foi apresentado pelos blocos fabricados com poeira de jateamento, os blocos fabricados com lodo galvânico apresentaram valores de absorção de água levemente acima do valor exigido pela legislação (6%, representado pela linha tracejada), com exceção dos blocos fabricados com 10% de lodo, cuja absorção apresentou-se duas vezes maior do que o limite máximo permitido.

#### 4.2.6.1 Correlação entre resistência à compressão e absorção de água

A Figura IV.16 apresenta o diagrama de dispersão para verificar a correlação entre os ensaios de resistência à compressão e absorção de água dos blocos fabricados com poeira de jateamento, com limite de confiança de 99%.

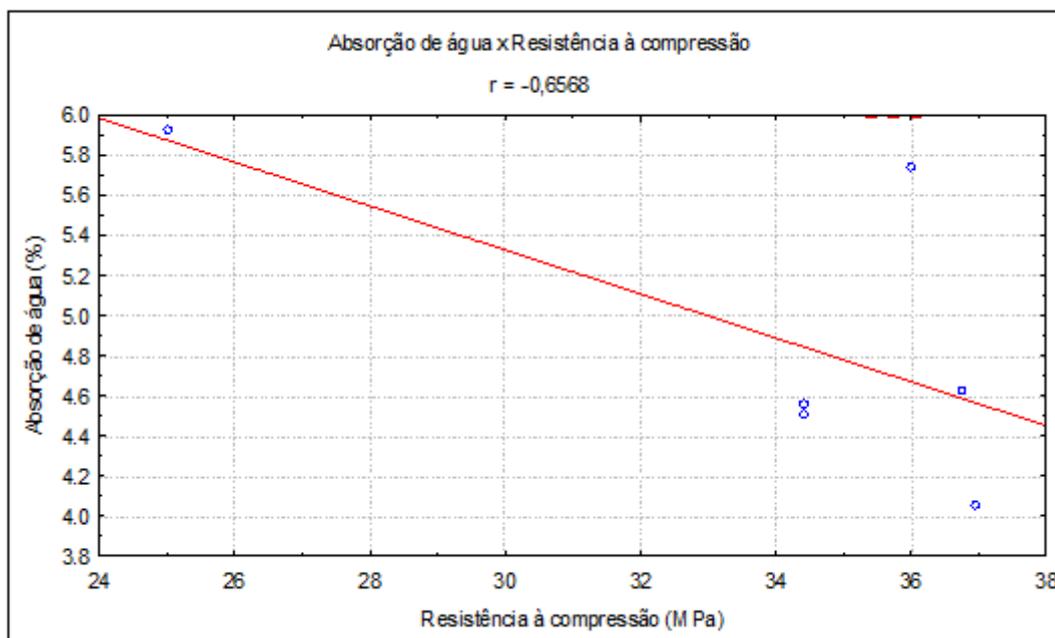


Figura IV.16 – Diagrama de dispersão para a resistência à compressão x absorção de água dos blocos fabricados com poeira de jateamento

De acordo com a Figura IV.16, o coeficiente de correlação “r” para a resistência à compressão e absorção de água foi igual a  $-0,6568$ , o que indica uma média correlação negativa entre as variáveis estudadas. De acordo com o critério de decisão para significância de r, o valor absoluto encontrado ( $0,6568$ ) deve ser maior do que o valor tabelado ( $r = 0,917$ ; para  $n = 6$ ) ao nível de significância de  $\alpha = 0,01$  para existir correlação. Logo, como  $0,6568 < 0,917$  as variáveis resistência à compressão e absorção de água para os blocos fabricados com poeira de jateamento não apresentam correlação.

A Figura IV.17 ilustra o diagrama de dispersão para os ensaios de resistência à compressão/absorção de água para os blocos fabricados com lodo galvânico. Nesse caso, pode-se observar que existe uma forte correlação negativa entre as variáveis ao nível de 1% de probabilidade, apresentando-se um coeficiente de correlação (r) igual a  $-0,9665$ .

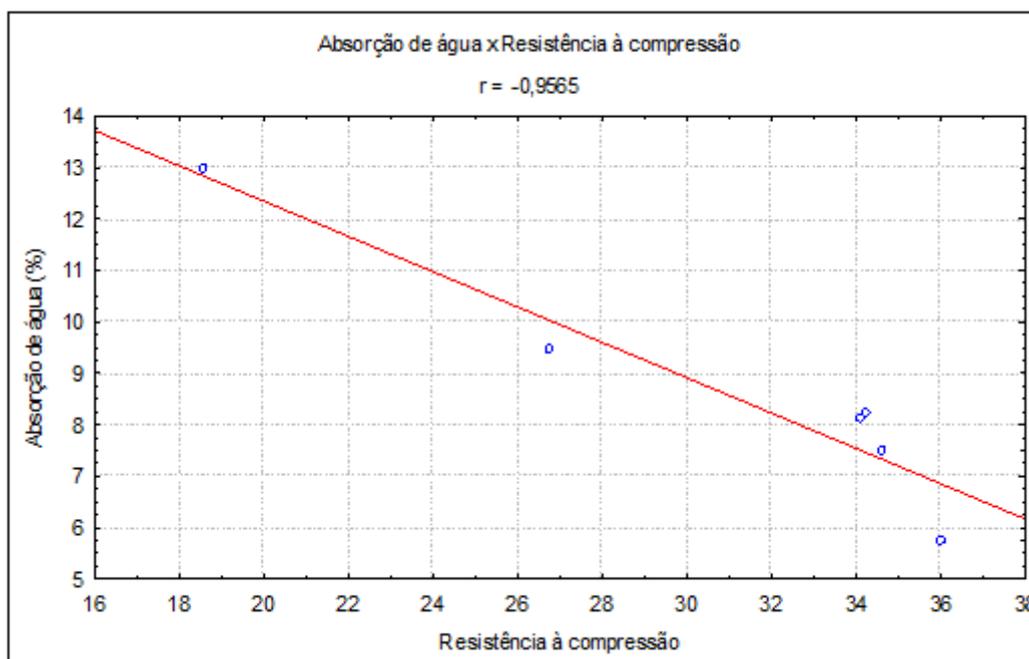


Figura IV.17 – Diagrama de dispersão para a resistência à compressão x absorção de água dos blocos fabricados com lodo galvânico

Segundo o critério de decisão para a significância de  $r$ , o valor absoluto de  $r$  encontrado ( $-0,9665$ ) é  $>$  (maior) do que o valor tabelado ( $0,917$ ) ao nível de significância de 1%. Portanto, para blocos de concreto fabricados com substituição parcial do agregado por lodo galvânico, as variáveis resistência à compressão e absorção de água estão correlacionadas.

De acordo com a correlação, com o aumento da resistência à compressão há a tendência de ocorrer a diminuição da absorção de água nos blocos de concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2008) e Neville (1997) essa é uma tendência em materiais hidráulicos e está relacionada à porosidade da pasta de concreto. Stegemann e Buenfeld (2003) encontraram resultados semelhantes para essas variáveis no trabalho em que avaliaram o comportamento da resistência à compressão em relação à idade das amostras de concreto, umidade e temperatura do ambiente.

#### 4.2.7 Microscopia Eletrônica de Varredura

As análises de microscopia eletrônica de varredura foram realizadas somente nos blocos com incorporação de 5% de poeira de jateamento e 4% de lodo galvânico, pois, essas porcentagens de substituição de resíduos foram as consideradas ideais para a obtenção de blocos de qualidade de acordo com os resultados apresentados.

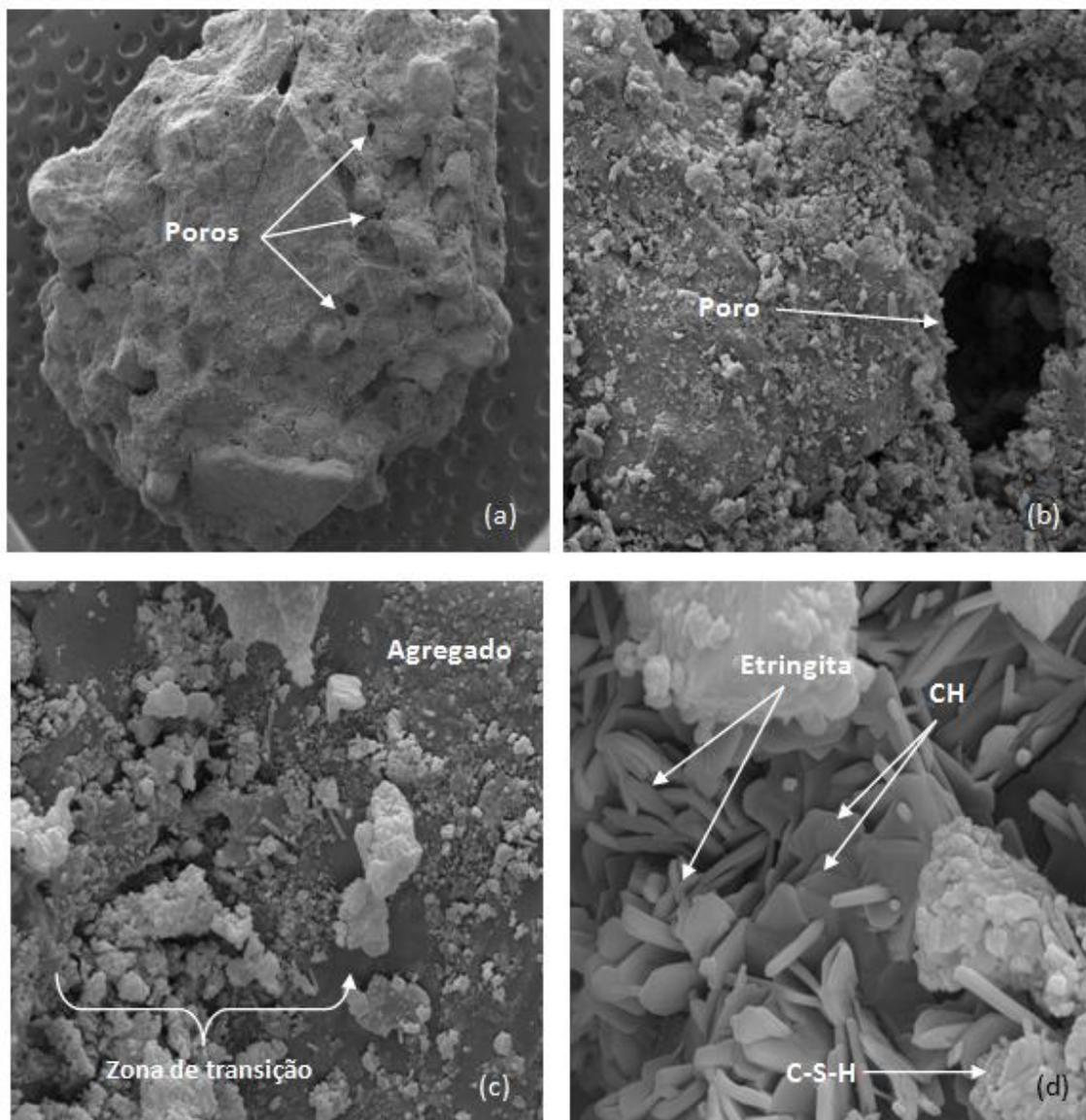
A Figura IV.18, Figura IV.19 e Figura IV.20 mostram as micrografias obtidas por MEV de amostras dos blocos referência e dos fabricados com 5% de poeira de jateamento e 4% de lodo de galvanoplastia, respectivamente.

A análise das imagens da microestrutura do concreto permite relacionar a morfologia do concreto com suas propriedades físicas e mecânicas, uma vez que a matriz cimentícia é constituída por diferentes compostos hidratados do cimento e, com base nas características destes compostos, podem ser obtidas informações importantes sobre a mesma.

Por meio da Figura IV.18 é possível visualizar regiões e estruturas típicas da microestrutura dos concretos. Nas Figuras IV.18 (a) e (b) observa-se a macroestrutura do concreto referência em que é possível distinguir duas regiões: agregados graúdos de diferentes formas e tamanhos, e o meio ligante, o qual consiste de uma massa contínua de pasta endurecida, além dos vazios (poros) presentes.

Visando facilitar o entendimento da microestrutura dos concretos e sua influência nas propriedades mecânicas e na durabilidade, a microestrutura dos concretos foi dividida em três regiões: região do agregado, que pode conter vários minerais, além de microfissuras e vazios; região da matriz da pasta de argamassa ou de cimento, com natureza complexa e dinâmica, e, matriz da zona de transição, que segundo MEHTA e MONTEIRO (2008) representa a região interfacial entre as partículas de agregado graúdo e a pasta de cimento, sendo uma camada delgada, tipicamente de 10 a 50  $\mu\text{m}$  de espessura ao redor do agregado graúdo. A região da zona de transição agregado-pasta pode ser visualizada com nitidez na Figura IV.18 (c). A região da zona de transição é geralmente considerada o elo mais fraco em relação às outras duas regiões do concreto e, conseqüentemente, exerce uma influência muito maior sobre o comportamento mecânico do concreto.

Figura IV. 18 - Microscopia eletrônica de varredura de amostras dos blocos de concreto sem adição de resíduo: (a) ampliação de 50 vezes, (b) ampliação 800 vezes, (c) ampliação 6000 vezes e (d) ampliação 20000 vezes

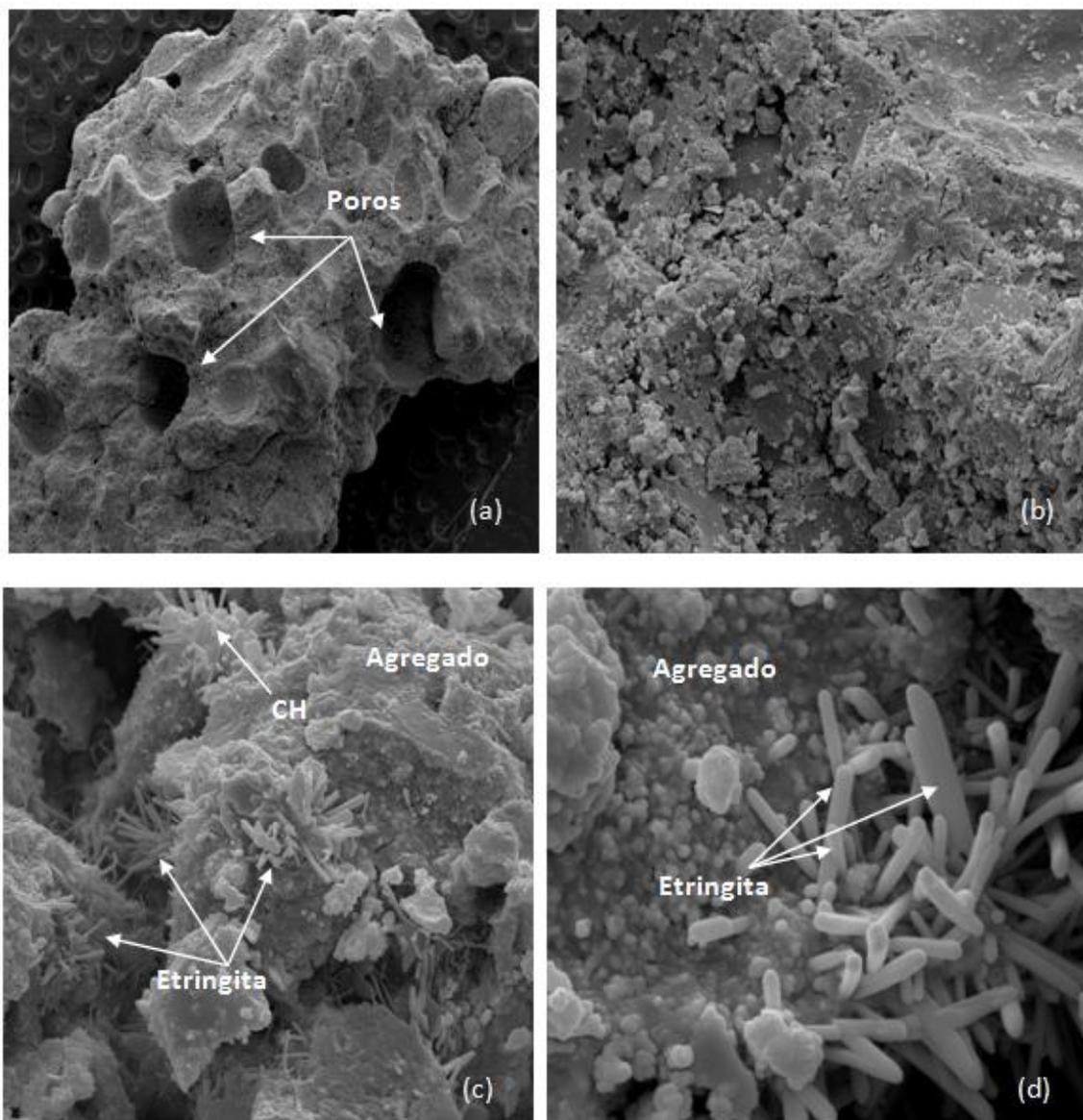


A Figura IV.18 (d) com ampliação de 20.000 vezes apresenta imagens das fases cristalinas presentes na região de transição. Verificou-se a presença de portlandita [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] representada pelo símbolo CH, que aparece na imagens como placas finas hexagonais e paralelas com superfícies de aspecto liso. Cristais de etringita podem ser visualizados na forma de bastões estreitos relativamente longos e sem ramificações. Além do gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que se apresentam na forma de fibras agrupadas, com cada grupamento partindo de um núcleo comum. O C-S-H juntamente com a portlandita se constitui os principais produtos da hidratação do

concreto, caracterizando-se como o principal componente responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica do mesmo.

As micrografias mostradas na Figura IV.19 trazem o aspecto da pasta de concreto dos blocos fabricados com 5% de poeira de jateamento. Por meio destas é possível observar os vazios presentes na matriz cimentícia (Figura IV.19 a e b) bem como a excelente interação entre agregado, resíduo e produtos da hidratação (Figuras IV. c e d).

Figura IV. 19 - Microscopia eletrônica de varredura de amostras dos blocos de concreto contendo 5% de poeira de jateamento: (a) ampliação de 50 vezes, (b) ampliação 800 vezes, (c) ampliação 6000 vezes e (d) ampliação 20000 vezes

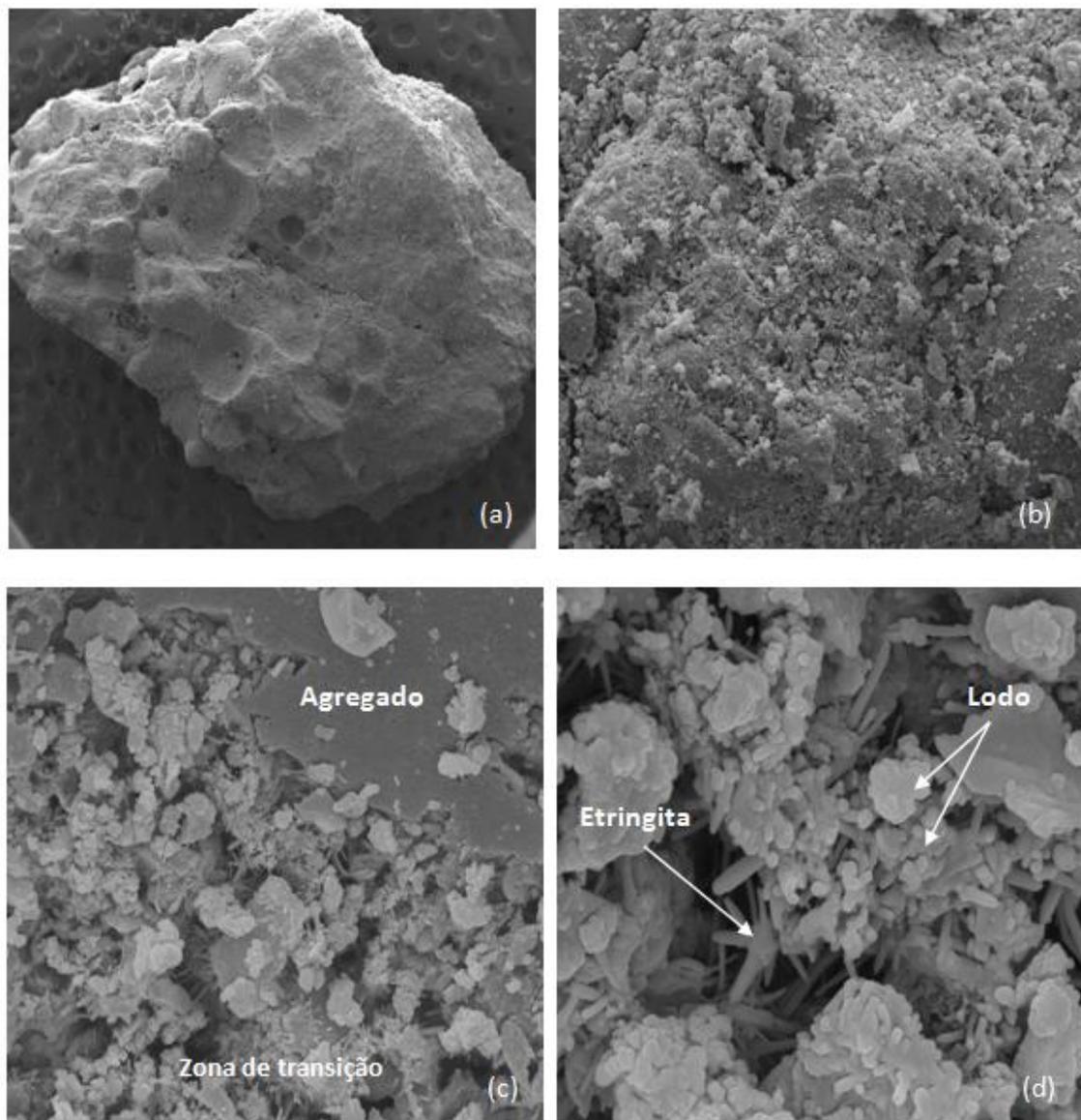


Em comparação com as imagens da Figura IV.18, foi possível observar um aumento da quantidade de cristais de etringita na microestrutura dos blocos fabricados com o resíduo. Isso vem corroborar com os resultados obtidos pela análise de fluorescência de raios-x (item 4.2.4) que detectou uma diminuição na porcentagem de anidrido sulfúrico (proveniente do  $\text{CaSO}_4$ ) presente nos blocos contendo poeira de jateamento, uma vez que a formação da etringita está diretamente relacionada com a reação dos aluminatos de cálcio hidratados com o gesso ( $\text{CaSO}_4$ ) presentes na pasta. A pequena ocorrência de cristais do tipo portlandita (CH) também foi verificada. Tal comportamento pode ser um indício do consumo de portlandita, devido a sua reação com a sílica adicional presente no resíduo resultando na formação do gel de C-S-H.

Assim como observado para os blocos com poeira de jateamento, na Figura IV.20 também foi possível visualizar os microporos presentes na pasta de concreto, a zona de transição agregado-pasta com a presença de grande concentração de cristais de etringita e C-S-H (Figura IV.20 c), bem como a boa interação entre o lodo galvânico e a matriz cimentícia (Figura IV.20 d). Tal interação é de extrema importância para a eficácia do processo de solidificação/estabilização dos contaminantes presentes no resíduo e para a manutenção da resistência necessária às peças de concreto.

Uma leve diminuição no aparecimento de cristais de portlandita também foi verificada.

Figura IV. 20 - Microscopia eletrônica de varredura de amostras dos blocos de concreto contendo 4% de lodo galvânico: (a) ampliação de 50 vezes, (b) ampliação 800 vezes, (c) ampliação 6000 vezes e (d) ampliação 20000 vezes



### 4.3 Conclusões Parciais

Com base nos resultados alcançados nos ensaios realizados nos blocos de concreto confeccionados com os resíduos galvânicos, pode-se apresentar as seguintes conclusões:

- Os ensaios de resistência à compressão e absorção de água indicaram a possibilidade de utilização de até 5% de poeira de jateamento e 4% de lodo

galvânico na fabricação de blocos de concreto para pavimentação sem acarretar em prejuízos significativos nas propriedades mecânicas e de durabilidade das peças;

- A eficácia do processo de solidificação/estabilização dos resíduos na matriz de cimento foi verificada por meio dos ensaios de lixiviação e solubilização. Tais resultados constataram que a utilização da poeira de jateamento e do lodo galvânico na fabricação do concreto dos blocos não interferiu significativamente na concentração dos metais lixiviados e solubilizados. O cálculo da efetividade de retenção dos metais a partir dos extratos lixiviado/solubilizado comprovou as afirmações anteriores, por meio das altas eficiências obtidas de imobilização dos metais;
- Apesar de apresentar características que o classificava como resíduo sólido perigoso, a poeira de jateamento parece ter sido perfeitamente incorporada à massa de concreto durante a fabricação dos blocos, levando à mudança nas suas características de periculosidade. Essa mudança na periculosidade do resíduo sugere que o processo de estabilização/solidificação foi capaz de imobilizar os metais na massa cimentícia de forma eficaz;
- Além da solidificação no aglomerante, os contaminantes presentes nos resíduos também foram estabilizados quimicamente na matriz de cimento como evidenciado pelos ensaios de difração de raios-x. Tais análises mostraram a imobilização química dos metais na forma de óxidos, sulfatos, cloretos e carbonatos metálicos insolúveis bem como na incorporação de alguns metais no interior dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H);
- A boa interação dos resíduos junto aos agregados e à pasta de concreto também foi confirmada via análises de microscopia. Tal interação está diretamente relacionada com a eficiente imobilização apresentada pelos contaminantes dos resíduos junto a matriz cimentícia bem como com a manutenção das características mecânicas e físicas necessárias às peças fabricadas.

## **CAPÍTULO V**

### **5 FABRICAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO EM ESCALA INDUSTRIAL**

A terceira parte do programa experimental compreendeu a fabricação dos blocos de concreto para pavimentação em escala industrial utilizando-se as quantidades ideais de poeira de jateamento e lodo galvânico definidos na etapa precedente (Capítulo IV), bem como a avaliação de suas propriedades.

#### **5.1 Metodologia**

A fabricação dos blocos de concreto para pavimentação em escala industrial foi realizada em uma indústria de artefatos de concreto localizada na região de Mandaguaçu-PR. A empresa disponibilizou gentilmente seus equipamentos, materiais (agregados) e funcionários para auxiliar na fabricação dos blocos.

A seguir serão apresentados os materiais e métodos utilizados na indústria para a fabricação dos pavimentos.

##### **5.1.1 Materiais utilizados**

Os materiais utilizados na fabricação industrial dos blocos são apresentados a seguir.

- *Aglomerante:*
  - Cimento CP V – ARI (Cauê)
- *Agregado miúdo:*
  - Pó de pedra fino
  - Areia grossa
- *Agregado graúdo:*
  - Pedrisco 3/8”

- Granilha 3/16”

- Água
- Resíduos (poeira de jateamento e lodo galvânico)

O cimento empregado na fabricação dos blocos foi comprado em distribuidoras da região e levado juntamente com os resíduos até a fábrica. A água utilizada foi a disponível pelo sistema de abastecimento do município de Mandaguaçu-PR e os agregados miúdos e graúdos utilizados foram cedidos pela própria indústria.

As Tabelas V.1 e V.2 apresentam a classificação granulométrica dos respectivos agregados fornecida pelos fabricantes.

Tabela V.1 – Classificação granulométrica dos agregados miúdos empregados na fabricação industrial dos blocos de concreto para pavimentação

Abertura da peneira (mm)	Pó de pedra fino			Areia grossa		
	Massa (g)	% retido	% retido acumulado	Massa (g)	% retido	% retido acumulado
4,80	0,0	0,0%	0,0%	10,0	1,0%	1,0%
2,40	35,0	3,5%	3,5%	66,0	6,8%	7,8%
1,20	264,0	26,6%	30,15	229,0	23,6%	31,5%
0,60	168,0	16,9%	47,0%	397,0	41,0%	72,4%
0,30	100,0	10,1%	57,0%	236,0	24,4%	96,8%
0,15	108,0	10,9%	67,9%	28,0	2,9%	99,7%
Fundo	319,0	32,1%	100%	3,0	0,3%	100,0%
	994,0	100%		969,0	100,0%	
Módulo de Finura		2,06			3,09	

Tabela V.2 – Classificação granulométrica dos agregados graúdos empregados na fabricação industrial dos blocos de concreto para pavimentação

Abertura da peneira (mm)	Pedrisco 3/8''			Granilha 3/16''		
	Massa (g)	% retido	% retido acumulado	Massa (g)	% retido	% retido acumulado
9,50	28,0	2,8%	2,8%	0,0	0,0%	0,0%
6,30	453,0	45,2%	48,0%	0,0	0,0%	0,0%
4,80	366,0	36,5%	84,5%	1,0	0,1%	0,1%
2,40	144,0	14,4%	98,9%	633,0	63,4%	63,5%
1,20	4,0	0,4%	99,3%	285,0	28,5%	92,0%
0,60	0,0	0,0%	99,3%	31,0	3,1%	95,1%
0,30	0,0	0,0%	99,3%	10,0	1,0%	96,1%
0,15	0,0	0,0%	99,3%	7,0	0,7%	96,8%
Fundo	7,0	0,7%	100,0%	32,0	3,2%	100,0%
	1000,0	100,0%		999,0	100,0%	
Módulo de Finura		5,83			4,44	

### 5.1.2 Traços e fabricação industrial dos blocos

Para a confecção dos blocos de concreto em escala industrial utilizou-se um traço pré-determinado pela própria empresa colaboradora, o mesmo é utilizado pela indústria para a fabricação de blocos comerciais, além de estar devidamente ajustado às condições do equipamento utilizado na fabricação dos artefatos. As proporções de matérias-primas (em massa) utilizadas podem ser observadas na Tabela V.3.

Tabela V.3 – Traços utilizados na fabricação industrial dos blocos com incorporação de resíduos

Traço	A/G	Cimento	Agregado miúdo		Agregado graúdo		Resíduo
			Pó de pedra fino	Areia grossa	Pedrisco 3/8''	Granilha 3/16''	
Referência	0,44	1,00	2,90	2,40	0,63	0,60	0,00
Poeira 5%	0,44	1,00	2,76	2,28	0,63	0,60	0,27
Lodo 4%	0,44	1,00	2,78	2,30	0,63	0,60	0,21

Referência – corpos-de-prova sem adição de resíduo, Poeira 5% - Blocos de concreto para pavimentação fabricados industrialmente com substituição de 5% do agregado miúdo por poeira de jateamento, Lodo 4% - Blocos de concreto para pavimentação fabricados industrialmente com substituição de 4% do agregado miúdo por lodo galvânico, A/G – relação água/aglomerante.

Os equipamentos disponibilizados para a fabricação industrial dos blocos de concreto estão apresentados nas Figuras V.1 e V.2.

A dosagem das matérias-primas (miúdos e graúdos) era efetuada por um dosador automático (Figuras V.1a e V.1b) calibrado com os traços disponibilizados pela

indústria e com uma velocidade de dosagem de  $10 \text{ kg s}^{-1}$ . Uma esteira transportadora encaminhava as matérias-primas dosadas para um misturador helicoidal (Figura V.1c) juntamente com a adição de cimento, resíduo (previamente pesado) e água (Figura V.1d). O tempo de mistura após a adição da água era de um minuto.



Figura V.1 – Momento de dosagem e mistura do concreto para fabricação dos blocos

O passo seguinte à mistura era o transporte do concreto pronto, por meio de uma esteira, para a caçamba de armazenamento da máquina vibro-compressora onde era realizada a moldagem dos blocos de concreto para pavimentação (Figuras V.2a e V.2b). A máquina vibro-compressora tem capacidade de produção de 12 blocos por ciclo ou 60 blocos por minutos, com desforma sobre paletes

Após a moldagem e desforma, os paletes contendo os blocos eram dispostos em prateleiras e levados para a cura simples em câmaras de concreto existentes na própria fábrica para a proteção contra as intempéries (Figura V.2c). Com uma semana de cura os blocos fabricados foram transportados para o Laboratório de Construção Civil da UEM (Figura V.2d) e dispostos em câmara úmida para cura até as idades desejadas para os ensaios.



Figura V.2 – Momento da moldagem, cura e transporte dos blocos

Ao todo foi fabricada uma média de 300 blocos (100 blocos para cada traço), utilizando-se um total de 198 quilos de cimento, 461,0 kg de areia grossa, 557,0 kg de pó de pedra fino, 118,8 kg de granilha, 124,7 kg de pedrisco 3/8 e aproximadamente 16,6 kg de poeira de jateamento e 14,4 kg de lodo galvânico. Os blocos fabricados apresentam as seguintes dimensões, 10 cm de largura x 6 cm de altura x 20 cm de comprimento.

### 5.1.3 Ensaios realizados

A seguir estão listados os ensaios realizados nos blocos de concreto para pavimentação fabricados em escala industrial. Todos os ensaios foram realizados nas mesmas condições, equipamentos e com as mesmas metodologias descritas nos Capítulos III e IV. A Tabela V.4 apresenta um resumo dos equipamentos e metodologias utilizadas. Apenas o ensaio de resistência à abrasão terá sua metodologia descrita a seguir.

Tabela V.4 – Ensaios realizados e respectivos equipamentos e/ou metodologias utilizadas

<i>Ensaio</i>	<i>Equipamento/Metodologia</i>	<i>Quantidade ensaiada/traço</i>
Lixiviação/pH	NBR 10005 (2004)	50 g
Solubilização	NBR 10006 (2004)	250 g
Fluorescência de raios-x	Espectrômetro de raios-x Rigaku, modelo ZSX Mini I	20 mg
Difração de raios-x	Difratômetro Bruker-AXS, D8 Advance	20 mg
Resistência à compressão	NBR 9781 (2013)	10 blocos
Absorção de água	NBR 9781 (2013)	4 blocos
Resistência à abrasão	Método CIENTEC	1 bloco

### 5.1.3.1 Resistência à abrasão

Nos blocos de concreto para pavimentação, a resistência à abrasão é uma propriedade tão importante quanto a resistência à compressão, apesar da norma brasileira preconizar a avaliação dessa propriedade apenas como facultativa, e de não existir um consenso nas normas internacionais quanto ao estabelecimento de um método padrão para a realização do ensaio. A abrasão pode ser definida como o desgaste por atrito, predominante em pavimentação, ocasionada pelo tráfego de pessoas e veículos. Ela está relacionada com a durabilidade das peças.

Como não foram encontradas instituições/laboratórios que disponibilizassem os equipamentos necessários para a realização dos ensaios de resistência à abrasão de acordo com a norma ABNT NBR 9781 (2013), para o presente trabalho, escolheu-se o método de ensaio de abrasão desenvolvido pela Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC), que já foi utilizado por pesquisadores como Viecilli (2004), Hood (2006), Amadei (2011) e Altoé (2013), para a avaliação do desgaste em blocos de concreto para pavimentação, fabricados com diferentes resíduos.

De cada bloco submetido ao ensaio são obtidos, por meio de corte em serra circular diamantada, dois corpos-de-prova destinados ao ensaio. O teste consiste na simulação de um percurso de 500 m percorridos pelo corpo-de-prova de 50 mm x 50

mm submetido a uma pressão constante de 0,06 MPa sobre carvão de silício (Figura V.3). O resultado é o desgaste em mm, que corresponde à média das diferenças entre as leituras efetuadas em cinco pontos do corpo-de-prova antes e após o ensaio. Para a realização dos ensaios foi utilizado apenas um bloco de concreto, de cada traço, na idade de cura de 28 dias, uma vez que este é um ensaio dispendioso.



Figura V.3 – Equipamento de ensaio de abrasão CIENTEC (VIECILLI, 2004)

## **5.2 Resultados e Discussão**

### **5.2.1 Lixiviação/ solubilização**

Os resultados dos ensaios de lixiviação encontram-se na Tabela V.5. Analisando-se as concentrações de metais lixiviados das matrizes solidificadas, observou-se que os resíduos dos blocos de concreto fabricados industrialmente com e sem a presença dos rejeitos galvânicos podem ser classificados como Classe II – não perigosos, pois as concentrações dos metais encontram-se abaixo dos limites máximos estipulados pela normativa que dispõe sobre a classificação dos resíduos sólidos (ABNT NBR 10004, 2004).

Tabela V.5 – Concentração de contaminantes presentes no extrato lixiviado dos blocos aos 28 dias de cura

<i>Contaminante</i>	<i>Limite NBR 10004/2004 (mg L<sup>-1</sup>)</i>	<i>Referência</i>	<i>5% Poeira de jateamento</i>	<i>4% Lodo galvânico</i>
<i>Ba</i>	70,00	44,41	51,16	47,85
<i>Cd</i>	0,50	0,02	0,02	0,02
<i>Pb</i>	1,00	0,35	0,31	0,33
<i>Cr</i>	5,00	0,13	0,01	0,16
<i>Hg</i>	0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
<i>Ag</i>	5,00	< 0,02	< 0,02	< 0,02
<i>Fluoreto (F<sup>-</sup>)</i>	150	0,128	n.d	n.d

Os valores indicados por < (menor que) estão abaixo do limite de detecção do aparelho utilizado

A Tabela V.6 mostra os resultados dos ensaios de solubilização. A análise dos extratos solubilizados indicou a presença de alumínio e bário excedendo os limites máximos estabelecidos pela legislação ambiental. Para a amostra contendo 4% de lodo galvânico, as concentrações de nitrato também excederam os padrões, o que permite classificar os resíduos sólidos provenientes dos blocos de concreto fabricados como não perigosos – não inertes. As concentrações de cádmio, chumbo, cromo e mercúrio mantiveram-se abaixo dos limites de detecção do aparelho de absorção atômica. Portanto, foram inconclusivas no que diz respeito à classificação dos resíduos.

Tabela V.6 - Concentração de contaminantes presentes no extrato solubilizado dos blocos aos 28 dias de cura

<i>Contaminante</i>	<i>Limite NBR 10004/2004 (mg L<sup>-1</sup>)</i>	<i>Referência</i>	<i>5% Poeira de jateamento</i>	<i>4% Lodo galvânico</i>
<i>Al</i>	0,20	10,53	11,80	12,47
<i>Ba</i>	0,70	17,45	23,54	26,14
<i>Cd</i>	0,005	< 0,02	< 0,02	< 0,02
<i>Pb</i>	0,01	< 0,10	< 0,10	< 0,10
<i>Cu</i>	2,00	< 0,03	0,03	0,03
<i>Cr</i>	0,05	< 0,06	< 0,06	< 0,06
<i>Fe</i>	0,30	< 0,06	0,06	< 0,06
<i>Mn</i>	0,10	< 0,02	0,02	0,02
<i>Hg</i>	0,001	< 0,10	< 0,10	< 0,10
<i>Ag</i>	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02
<i>Na</i>	200	64,32	84,22	46,31
<i>Cloreto (Cl<sup>-</sup>)</i>	250	n.d	27,05	13,83
<i>Fluoreto (F<sup>-</sup>)</i>	1,50	n.d	n.d	n.d
<i>Nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</i>	10,00	6,873	1,84	12,40
<i>Sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</i>	250	14,995	4,13	58,11
<i>pH</i>	-	12,8	13,0	12,8

Os valores indicados por < (menor que) estão abaixo do limite de detecção do aparelho utilizado

### 5.2.2 Eficiência de retenção de contaminantes na estabilização/solidificação

O cálculo da efetividade de imobilização dos metais nas matrizes de cimento é apresentado a seguir. A Tabela V.7 mostra a eficiência de retenção, avaliada a partir do extrato lixiviado e a Tabela V.8 a eficiência de retenção avaliada a partir do extrato solubilizado, dos blocos confeccionados com os resíduos de galvanoplastia. Novamente, o mercúrio foi excluído do cálculo por não apresentar variação em sua concentração.

Tabela V.7 – Eficiência de retenção ( $E_{\text{retenção}}$  %) de metais a partir do extrato lixiviado dos blocos

Elementos	Substituições	
	5% Poeira de jateamento	4% Lodo galvânico
<i>Ba</i>	0,00	0,00
<i>Cd</i>	100,00	100,00
<i>Pb</i>	100,00	100,00
<i>Cr</i>	100,00	16,67
<i>Ag</i>	100,00	100,00

Com relação ao lixiviado das amostras contendo 5% poeira de jateamento, todos os metais apresentaram 100% de retenção na matriz cimentícia, com exceção do bário. Para as amostras contendo 4% lodo galvânico a avaliação da retenção dos metais no extrato lixiviado, mostrou máximas retenções para o cádmio, chumbo e prata, bem como baixa ou nenhuma retenção para o cromo e bário. Esses resultados são semelhantes àqueles encontrados para os blocos fabricados em escala piloto, como apresentado no Capítulo IV.

Tabela V.8 - Eficiência de retenção ( $E_{\text{retenção}}$  %) de metais a partir do extrato solubilizado na matriz dos blocos

Elementos	Substituições	
	5% Poeira de jateamento	4% Lodo galvânico
<i>Al</i>	0,00	0,00
<i>Ba</i>	0,00	0,00
<i>Cd</i>	100,00	100,00
<i>Pb</i>	100,00	100,00
<i>Cu</i>	100,00	100,00
<i>Cr</i>	100,00	100,00
<i>Fe</i>	100,00	100,00
<i>Mn</i>	100,00	100,00
<i>Na</i>	28,17	90,32

O extrato solubilizado dos blocos fabricados industrialmente contendo os resíduos mostrou que somente o alumínio e o bário não apresentaram imobilização por estabilização/solidificação no aglomerante. O primeiro provavelmente devido à sua capacidade de se ressolubilizar em meios com pH muito alto e o segundo devido à sua presença em grandes concentrações no cimento utilizado para a fabricação dos blocos.

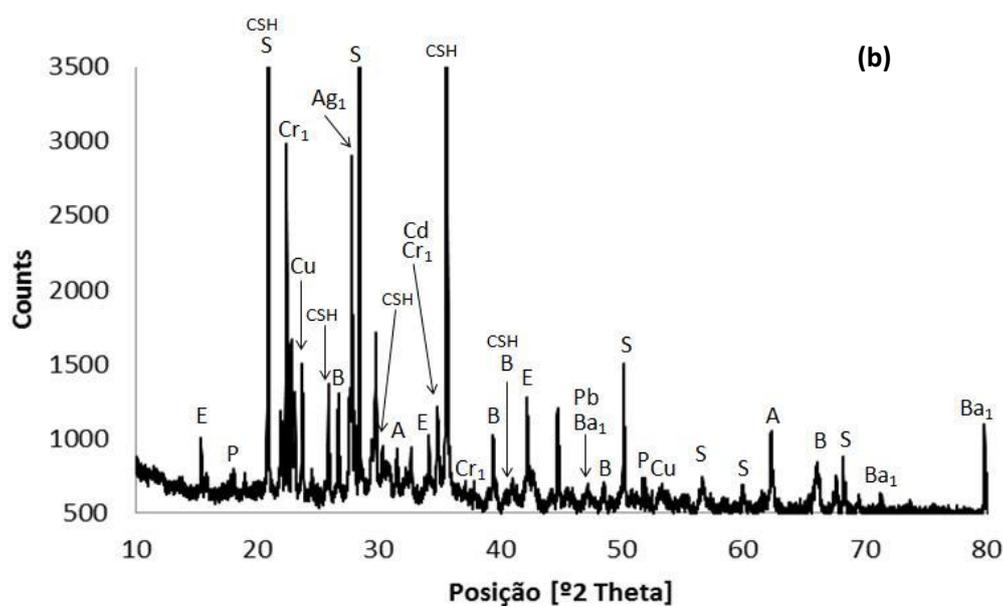
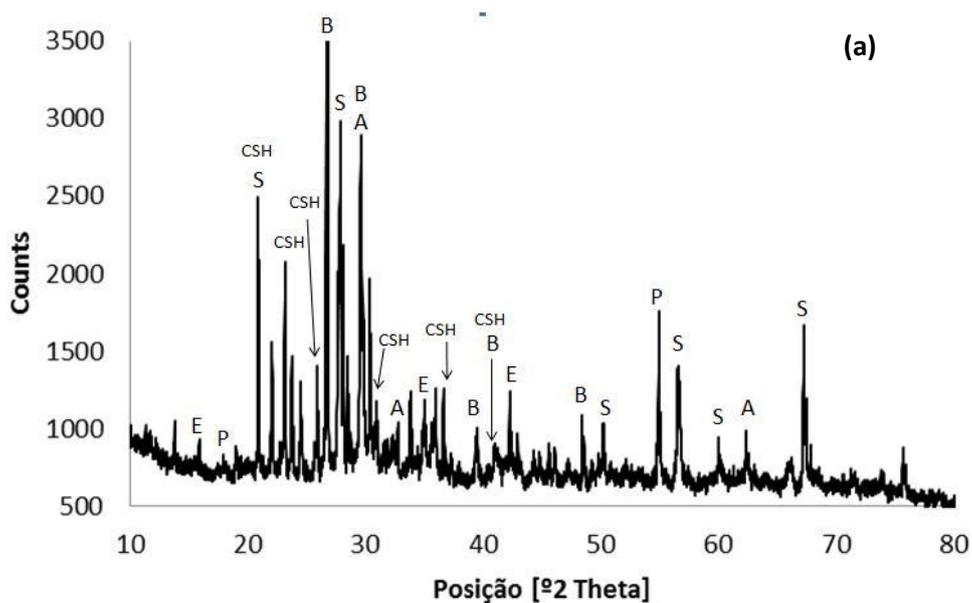
Mesmo com a indicação de que alguns metais não apresentaram retenção nas matrizes de cimento dos blocos, a concentração remanescente desses metais não influenciou significativamente os resultados de lixiviação/solubilização observados no item 5.2.1. Não expondo o ambiente a riscos de contaminação, permanecendo dentro dos limites legais de periculosidade.

### 5.2.3 Difração de raios-x e fluorescência de raios-x

Os difratogramas obtidos por meio da análise de difração de raios-x em amostras das peças após 28 dias de cura, estão apresentados na Figura V.4. A Tabela V.9 traz a relação e identificação dos principais compostos cristalinos detectados nas amostras solidificadas.

Tabela V.9 – Compostos cristalinos avaliados para as amostras solidificadas dos blocos

<i>Nomenclatura</i>	<i>Compostos</i>
A	Alita – silicato tricálcico (C <sub>3</sub> S)
B	Belita – silicato dicálcico (C <sub>2</sub> S)
S	Sílica – (SiO <sub>2</sub> )
CSH	Silicato dicálcico hidratado - tobermorita
E	Etringita – Alumino sulfato de cálcio hidratado
P	Portlandita – hidróxido de cálcio (Ca(OH) <sub>2</sub> )
Cu	Sulfato de cobre (CuSO <sub>4</sub> )
Ag <sub>1</sub>	Cloreto de prata (AgCl)
Ag <sub>2</sub>	Carbonato de prata (Ag <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
Ba <sub>1</sub>	Sulfato de bário (BaSO <sub>4</sub> )
Pb	Chumbo incorporado ao C-S-H (Ca <sub>4</sub> .6OPb.322Si.6O.16H <sub>2</sub> O)
Cr <sub>1</sub>	Cromo incorporado ao C-S-H (2CaO.SiO <sub>2</sub> .Cr.2H <sub>2</sub> O)
Cd	CdCa(OH) <sub>4</sub>



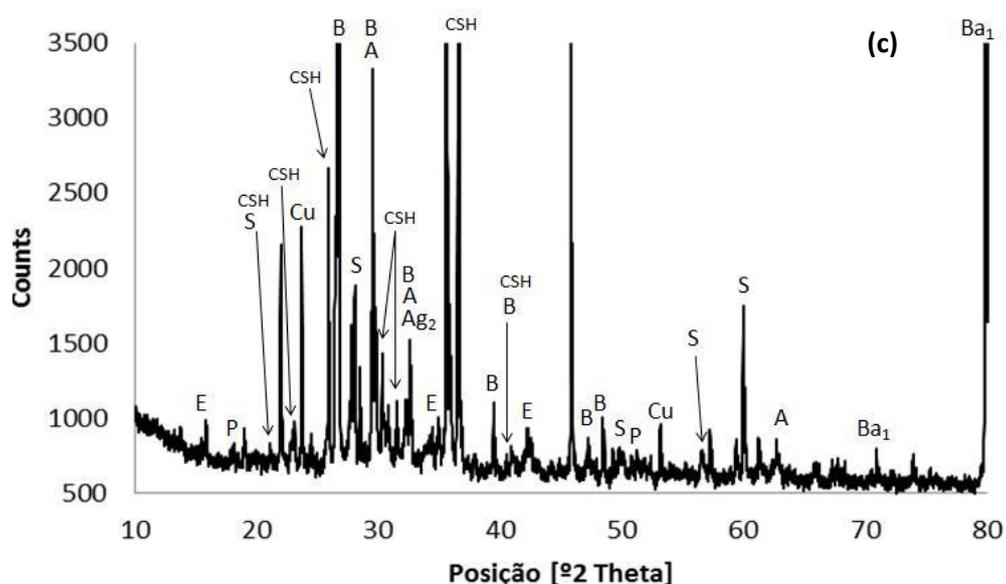


Figura V.4 - Difratomogramas de raios-x dos blocos fabricados com resíduos galvânicos, (a) referência, (b) 5% de poeira de jateamento, (c) 4% de lodo galvânico

Como já era esperado, produtos das reações de hidratação do cimento como hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio hidratados, etringita, além de silicatos dicálcicos, tricálcicos e sílica foram os principais picos presentes nas amostras dos blocos sem a adição de resíduo ou referência (Figura V.4 a).

Os difratogramas revelaram diferenças significativas no que diz respeito às fases cristalinas presentes nos blocos referências e nos blocos com a adição de resíduo. Com o acréscimo de 5% de poeira de jateamento e 4% de lodo galvânico (Figuras V.4 b e Figura V.4 c, respectivamente), observou-se o aparecimento de picos correspondentes a interações dos metais (presentes nos resíduos) com os produtos de hidratação do cimento, tais como  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{Cr}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CdCa}(\text{OH})_4$  que podem ser observados na Figura V.4 b, bem como compostos provenientes da precipitação dos metais em meio alcalino, como por exemplo,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{AgCl}$ ,  $\text{BaSO}_4$  e  $\text{Ag}_2\text{CO}_3$ , além de algumas raias de difração não identificadas. Tais resultados permitem comprovar quais mecanismos de estabilização química estão atuando na imobilização desses metais na matriz de cimento.

Os resultados da análise de fluorescência de raios-x realizados nos blocos de concreto estão dispostos na Tabela V.10.

Tabela V.10 – Porcentagem em massa dos compostos na composição dos blocos de concreto fabricados com resíduos galvânicos

Compostos	Substituição		
	Referência	5% Poeira de jateamento	4% Lodo galvânico
<i>MgO</i>	0,85	n.d	n.d
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	3,23	2,63	2,44
<i>SiO<sub>2</sub></i>	19,16	15,53	19,13
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	0,27	1,32	0,37
<i>SO<sub>3</sub></i>	9,06	7,51	8,53
<i>K<sub>2</sub>O</i>	0,84	0,90	0,85
<i>CaO</i>	37,56	42,89	41,08
<i>TiO<sub>2</sub></i>	3,41	2,37	2,48
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	24,88	25,33	23,95
<i>Cl</i>	n.d	0,02	n.d
<i>MnO</i>	0,45	0,33	0,43
<i>SrO</i>	0,30	0,36	0,39
<i>ZnO</i>	n.d	0,68	0,14

n.d – não detectado pelo equipamento

Ao analisar os resultados da Tabela V.10 não foram verificadas alterações significativas nas porcentagens dos compostos presente no concreto dos blocos com adição dos resíduos se comparados com os blocos referência.

#### 5.2.4 Resistência à compressão

Com relação às propriedades mecânicas dos blocos de concreto fabricados industrialmente, a Figura V.5 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão efetuados aos 7, 14 e 28 dias de cura, seguida da análise de variância desses resultados (Tabela V.11) obtidos aos 28 dias de hidratação. Os resultados completos estão disponíveis no Apêndice A.

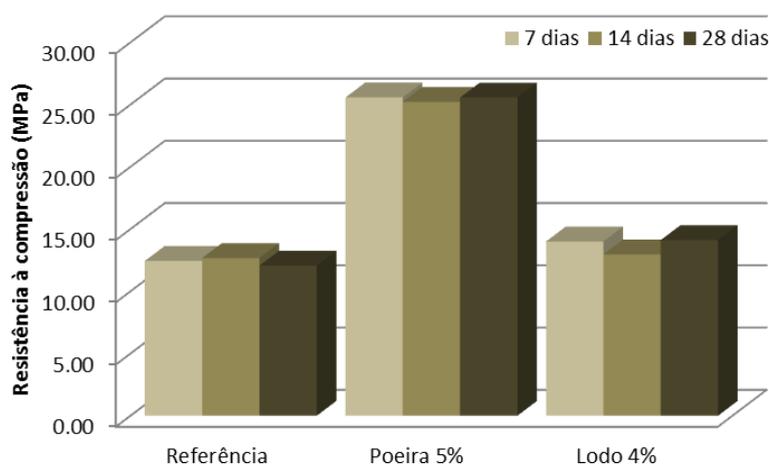


Figura V.5 – Resistência à compressão dos blocos fabricados industrialmente

Tabela V.11 – Tabela ANOVA para a resistência à compressão dos blocos aos 28 dias de cura

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média quadrática	F	Pvalor
Tratamentos	2	1059,826	529,913	57,0237	0,000*
Erro	27	250,907	9,293		
Total	29	1310,733			

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Pvalor < 0,01)

Pode-se observar que foram atingidas resistências médias de 12 MPa; 26 MPa e 14 MPa para a amostra referência e para as amostras contendo 5% de poeira de jateamento e 4% de lodo galvânico, respectivamente, aos 28 dias de cura. Utilizando-se do tratamento estatístico, a análise ANOVA dos resultados (Tabela V.11) mostrou que existe significância entre os três tratamentos, ou seja, as médias dos valores de resistência à compressão são diferentes entre si ao nível de 1% de probabilidade, pois Pvalor foi menor que 0,01.

Para verificar quais médias são diferentes entre si significativamente, o teste de Tukey (Tabela V.12) foi aplicado aos resultados.

Tabela V.12 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos blocos aos 28 dias de cura

Tratamento	Média (MPa)
Referência	12,06 a
5% poeira de jateamento	25,57 b
4% Lodo galvânico	14,11 a

Notas: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 1% de probabilidade pelo Teste de Tukey

A análise estatística indicou que não houve diferenças significativas entre as médias de resistência à compressão dos blocos referência e dos blocos fabricados com 4% de lodo galvânico. Já os blocos contendo 5% de poeira de jateamento apresentaram resistências superiores e significativamente diferente das demais, com 99% de confiança.

Os resultados anteriores indicam que, ao serem fabricados em escala industrial os blocos de concreto com adição de poeira de jateamento apresentaram características mecânicas superiores (com aumento de 112% na resistência) àquelas dos blocos disponíveis comercialmente ou referência. Os blocos contendo 4% de lodo apresentaram médias de resistências semelhantes às apresentadas pela amostra referência.

Um aumento gradativo da resistência à compressão dos blocos era esperado com o aumento do tempo de hidratação do cimento de 7 para 28 dias. Entretanto esse comportamento não foi verificado nas amostras analisadas, como mostra a Figura V.5. Isso pode estar relacionado a não homogeneidade dos blocos utilizados no ensaio.

Discrepâncias com relação à resistência à compressão foram observadas no comportamento dos blocos fabricados em escala piloto e em escala industrial. Como visto, em escala piloto a adição de 5% de poeira de jateamento não alterou significativamente os valores de resistência à compressão dos blocos, porém na fabricação industrial a adição dessa mesma quantidade de resíduo em substituição ao agregado miúdo teve como consequência a duplicação do valor dessa propriedade mecânica.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a resposta do concreto às tensões aplicadas depende não apenas do tipo de tensão, mas também de como a combinação de vários fatores que afetam a porosidade dos diferentes componentes estruturais do concreto. Os fatores incluem propriedades e proporções dos materiais que formam o traço do concreto, o grau de compactação, as condições de cura, relação água/aglomerante, etc.

Nesse sentido, a diferença de comportamento mecânico entre os blocos fabricados em escala piloto e industrialmente estão relacionadas aos diferentes traços e materiais utilizados em cada fabricação, diferenças no tipo utilizado de máquina vibro-compressora utilizada na moldagem das peças, bem como no grau de interação da poeira de jateamento junto ao cimento.

Os resultados do cálculo da resistência característica à compressão ( $F_{pk}$ ) juntamente com os valores médios de resistência ( $F_p$ ) são mostrados na Tabela V.13.

Tabela V.13 – Resistência à compressão e resistência característica à compressão dos blocos de concreto fabricados com resíduos galvânicos

Referência		5% Poeira de jateamento		4% Lodo galvânico	
$F_p$ (MPa)	$F_{pk}$ (MPa)	$F_p$ (MPa)	$F_{pk}$ (MPa)	$F_p$ (MPa)	$F_{pk}$ (MPa)
12,06	9,66	25,57	22,18	14,11	11,99

Um ponto que chama atenção é o baixo valor de resistência característica à compressão obtida para as amostras dos blocos referência, uma vez que, aos 28 dias de cura, a norma ABNT NBR 9781 (2013) preconiza que os valores mínimos devem ser de 35 MPa para pavimentação de vias com tráfego leve. Os valores obtidos podem ser resultado da baixa quantidade de cimento utilizada na fabricação industrial dos pavers, uma vez que a relação aglomerante/agregado utilizada foi de 1:6,5 o que corresponde a 1 kg de cimento para 6,5 kg de agregados. Autores como Franco (2011), Altoé (2013) e Amadei (2011) utilizaram traços da ordem de 1:4 para a relação aglomerante/agregado na fabricação de blocos de concreto para pavimentação e obtiveram valores de resistência próximos ou superiores a 35 MPa.

As resistências características obtidas com a ruptura dos blocos fabricados com os rejeitos (Tabela V.13) apresentaram valores inferiores ao mínimo estabelecido de 35 MPa. Contudo, pesquisadores como Fioriti (2007) e Altoé (2013) afirmam que resistências à compressão de 15 MPa já são satisfatórias, uma vez que esse valor já é suficiente para suportar a sobrecarga que será exercida em calçadas, praças e locais de trânsito leve. Fioriti (2007) propõe ainda, que os valores exigidos pela norma brasileira deveriam ser reduzidos considerando a aplicação do material, como já é feito em países que dominam a fabricação de bloco para pavimentação, como a Austrália e a África do Sul.

Neste contexto, os pavimentos fabricados com poeira de jateamento e lodo de galvanoplastia apresentaram resistências que condizem com os valores sugeridos pelos autores, podendo ser aplicados em locais com solicitações menores, como por exemplo, em ciclovias, praças, passeios, áreas de lazer, etc.

### 5.2.5 Absorção de água

Os resultados médios obtidos nos ensaios de absorção de água constam na Figura V.6. Os resultados individuais de cada bloco ensaiado estão disponíveis no Apêndice B. A Tabela V.14 mostra a análise ANOVA dos resultados médios de absorção de água dos blocos aos 28 dias de hidratação.

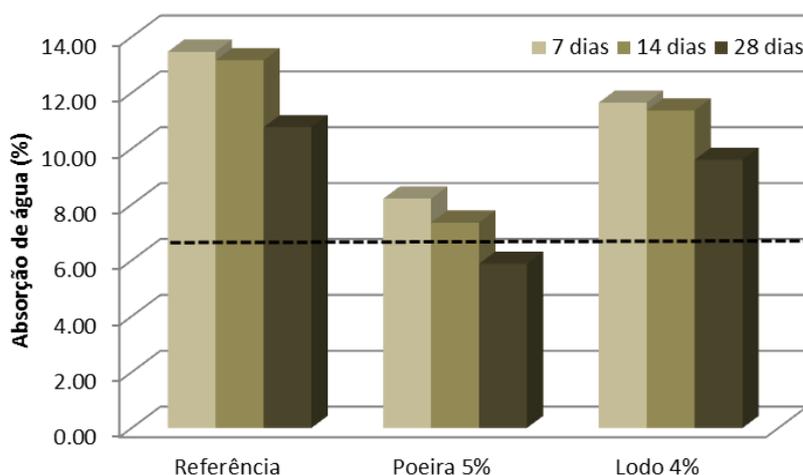


Figura V.6 – Absorção de água dos blocos fabricados industrialmente

Tabela V.14 – Tabela ANOVA para a absorção de água dos blocos aos 28 dias de cura

<i>Fonte de variação</i>	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Soma dos quadrados</i>	<i>Média quadrática</i>	<i>F</i>	<i>Pvalor</i>
<i>Tratamentos</i>	2	52,0875	26,0437	9,6767	0,0057*
<i>Erro</i>	9	24,2224	2,6914		
<i>Total</i>	11	76,3099			

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Pvalor < 0,01)

Por meio da Figura V.6 observou-se uma tendência de decaimento da absorção de água com o aumento do tempo de cura dos concretos, sendo que na idade de 28 dias as médias de absorção ficaram em torno de 11%, 6% e 10%, para a amostra referência e para as amostras contendo 5% de poeira de jateamento e 4% de lodo, respectivamente.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a absorção de água está ligada à porosidade das peças, em qualquer estágio durante o processo de hidratação, ao tamanho e à continuidade dos poros, que controlam a permeabilidade do concreto. Com o aumento do tempo de cura e, conseqüente, com o desenvolvimento das reações de hidratação do cimento, a maioria dos poros presentes na pasta de concreto terão seus

tamanhos reduzidos (devido ao preenchimento dos espaços pelos produtos da hidratação) e perderão suas interconexões, reduzindo, assim, a permeabilidade e absorção de água dos blocos.

A análise de variância (Tabela V.14) mostrou que há diferenças significativas ao nível de 1% de probabilidade entre as médias de absorção de água determinadas, visto que o Pvalor (0,0057) mostrou-se menor que  $\alpha$  (0,01). Para verificar quais médias foram realmente diferentes entre si, o teste de comparação múltipla (teste de Tukey) foi aplicado e seus resultados estão apresentados na Tabela V.15.

Tabela V.15 – Teste de Tukey para a absorção de água dos blocos aos 28 dias de cura

<i>Tratamento</i>	<i>Média (MPa)</i>
<i>Referência</i>	10,76 a
<i>5% poeira de jateamento</i>	5,88 b
<i>4% Lodo galvânico</i>	9,60 ab

Notas: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 1% de probabilidade pelo Teste de Tukey

O teste de Tukey mostrou que os valores de absorção de água dos blocos referência e dos blocos contendo 5% de poeira de jateamento são as médias que apresentam diferenças significativas entre si, com 99% de confiança. O primeiro apresentando média superior com relação ao segundo. Os blocos contendo 4% de lodo galvânico apresentaram valores de absorção semelhantes aos demais blocos de concreto produzidos.

Esses resultados são uma indicação de que a substituição de 4% dos agregados do concreto por lodo galvânico na fabricação de blocos para pavimentação não altera significativamente a durabilidade das peças fabricadas. No entanto, quando ocorre a substituição por 5% de poeira de jateamento, os blocos apresentam características de durabilidade superiores (com diminuição de 45% na absorção de água) a dos blocos disponíveis comercialmente ou referência.

Segundo a norma ABNT NBR 10004 (2004), o valor máximo de absorção de água para peças de concreto para pavimentação deve ser de 6% (o limite está representado no gráfico da Figura V.6 como uma linha tracejada). Verificou-se que a absorção de água dos bloco confeccionados com poeira de jateamento, mantiveram-se dentro do limite preconizado pela norma supracitada. Os demais valores, inclusive das amostras referência, foram superiores ao permitido. Acredita-se que a utilização de uma maior quantidade de cimento, ou seja, uma diminuição da relação aglomerante/agregado

na fabricação das peças pode vir a minimizar ainda mais a absorção de água dos blocos fazendo com que os mesmos permaneçam dentro dos limites estabelecidos.

### 5.2.6 Resistência à abrasão

Os resultados do ensaio de resistência à abrasão dos blocos, exibidos em índices de desgaste das peças individuais bem como os valores médios estão dispostos na Tabela V.16.

Tabela V.16 - Índice de desgaste / resistência à abrasão (mm)

<i>Peças</i>	<i>Corpo de prova</i>	<i>Índice de desgaste (mm)</i>	
		<i>Individual</i>	<i>Média</i>
<i>Referência</i>	1	12,81	12,88
	2	12,94	
<i>5% Poeira de jateamento</i>	1	9,12	9,41
	2	9,70	
<i>4% Lodo galvânico</i>	1	9,37	10,34
	2	11,30	

Tabela V.17 – Tabela ANOVA para o índice de desgaste/resistência à abrasão dos blocos

<i>Fonte de variação</i>	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Soma dos quadrados</i>	<i>Média quadrática</i>	<i>F</i>	<i>Pvalor</i>
<i>Tratamentos</i>	2	12,8756	6,4378	9,472	0,05055*
<i>Erro</i>	3	2,0391	0,6797		
<i>Total</i>	5	14,9741			

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Pvalor > 0,01)

Aplicando a análise de variância aos resultados, verifica-se na Tabela V.17 que não há diferenças significativas entre as médias dos tratamentos (Pvalor > 0,01), ou seja, há uma forte indicação de que a adição de 4% de lodo e 5% de poeira de jateamento na confecção do concreto não influenciou significativamente a resistência à abrasão dos blocos.

Apesar do índice de desgaste pelo método Cientec não apresentar valores máximos definidos por normas brasileiras e o próprio método sugerir que seja utilizado como parâmetro de comparação ao valor obtido no traço referência, Hood (2006) sugere que o desgaste seja limitado a 15 mm, valor médio utilizado por diversos autores. Com isso, verificou-se que todas as peças ensaiadas apresentaram índices dentro do limite sugerido pelo autor supracitado.

Comparativamente aos resultados verificados por Hood (2006) e Altoé (2013), que utilizaram o método Cientec, foram observados no presente trabalho valores de desgaste compatíveis com os encontrados por ambos os autores.

### **5.3 Conclusões Parciais**

Por meio da discussão dos resultados obtidos anteriormente, algumas conclusões puderam ser apresentadas:

- As peças de concreto fabricadas em escala industrial utilizando-se 5% de poeira de jateamento apresentaram características mecânicas e físicas superiores quando comparadas com os blocos disponíveis comercialmente ou referência. Houve um aumento de 112% na resistência à compressão e um decréscimo de 45% na absorção de água dos blocos quando da adição desse resíduo;
- A utilização de 4% de lodo galvânico na fabricação dos blocos não influenciou significativamente nenhuma das características (física, química e mecânica) das peças de concreto, se apresentando semelhante aos blocos já fabricados pela indústria;
- Os blocos produzidos em escala industrial, tanto os blocos referência como àqueles produzidos com os resíduos, mostraram-se aptos a serem utilizados para a pavimentação de locais de tráfego leve;
- Os ensaios químicos realizados, permitiram verificar o atendimento da estabilidade necessária aos contaminantes presentes tanto na poeira de jateamento quanto no lodo galvânico, comprovando que a utilização desses resíduos quando utilizados como matéria-prima na construção civil não afeta as características de mobilidade dos metais, excluindo problemas de contaminação ambiental;
- Uma consideração chave que governa muitos dos princípios que fundamentam os procedimentos da dosagem do concreto é o reconhecimento de que o cimento custa muito mais caro do que os agregados. Portanto, muitas vezes as indústrias fabricantes de artefatos de concreto tomam medidas para reduzir o consumo de cimento das misturas para que as peças sejam economicamente atrativas, em detrimento às características de desempenho desejadas. Acredita-se que utilização de uma maior quantidade de cimento na fabricação das peças de

concreto pelas indústrias pode vir a melhorar ainda mais as características apresentadas pelas peças fabricadas com os resíduos galvânicos, permitindo que as mesmas atinjam os valores de qualidade exigidos.

#### 5.4 Cenários da reutilização de poeira de jateamento e lodo galvânico na indústria de pavimentos intertravados

De posse dos resultados e conclusões parciais apresentados neste capítulo, com a possibilidade de utilização da poeira de jateamento e do lodo galvânico na fabricação de blocos de concreto para utilização na pavimentação de locais com solicitações leves de tráfego, pode-se realizar uma simulação de estimativas do consumo dos resíduos de galvanoplastia:

- Cenário 1: incorporação de 5% em massa de poeira de jateamento no concreto dos blocos para pavimentação: de acordo com o traço utilizado serão necessários aproximadamente 166 kg de poeira galvânica para a produção de 1000 blocos de concreto para pavimentação. Tomando-se como exemplo a indústria de artefatos de concreto Paviman que segundo o engenheiro responsável produz uma média de 15.000 blocos por dia (300 m<sup>2</sup>), ter-se-á um consumo diário de 2.490 kg de resíduo. Segundo os responsáveis, a indústria trabalha 22 dias por mês, assim, ter-se-ia um consumo mensal em torno de 54.780 kg de resíduo na produção de 330.000 blocos de concreto para pavimentação, suficientes para pavimentar 6.600 m<sup>2</sup>. Esses dados apontam para uma economia de mais de 54 toneladas de agregado miúdo. Anualmente, a quantidade de poeira de jateamento reutilizada poderá chegar a 657 toneladas. De acordo com a indústria (classificada como de médio porte) fornecedora dos resíduos galvânicos, são gerados aproximadamente 200 kg por mês de poeira de jateamento durante o processo produtivo das peças galvanizadas. Por meio desses dados é possível estimar que para suprir a demanda mensal de 54,8 toneladas de poeira de jateamento para a fabricação dos blocos de concreto, seriam necessários a reutilização dos resíduos de cerca de 274 indústrias galvânicas de médio porte.
- Cenário 2: incorporação de 4% em massa de lodo galvânico no concreto dos blocos para pavimentação: serão necessário aproximadamente 144 kg de lodo para a produção de 1000 blocos. Utilizando a incorporação de 4%, ter-se-ia um

consumo de resíduo em torno de 2.160 kg/dia, e considerando que a fábrica trabalha 22 dias por mês, ter-se-ia um consumo mensal de aproximadamente de 47.520 kg de lodo galvânico na produção de 330.000 blocos. Bem como a economia de mais de 47 toneladas de matéria-prima (agregados). Anualmente, a quantidade de lodo reutilizada poderá ser de aproximadamente 570 toneladas. Segundo a indústria fornecedora são gerados cerca de 205 kg de lodo galvânico por mês. Nesse caso seriam necessários a reutilização do lodo gerado em aproximadamente 232 indústrias galvânicas de médio porte para suprir a demanda mensal de 47,5 toneladas desse resíduo na fabricação de blocos de concreto para pavimentação.

Esses cenários indicam claramente a possibilidade de uma redução significativa na quantidade de resíduos galvânicos no que diz respeito à necessidade de disposição final em aterros.

Portanto, conforme as estimativas apresentadas, a utilização de resíduos da indústria galvanotécnica na confecção de concreto para pavimentos intertravados contribuirá para a minimização da disposição desse tipo de resíduo em aterros, reduzindo possíveis contaminações ambientais. O uso desses resíduos contribuirá para a economia das matérias-primas utilizadas na fabricação de concretos, além do surgimento de um novo material alternativo para a indústria da construção civil.

## CAPÍTULO VI

### 6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados alcançados no trabalho experimental, juntamente com as informações obtidas por meio da revisão bibliográfica, concluiu-se que tanto a poeira de jateamento quanto o lodo galvânico podem ser utilizados na fabricação de concretos para a indústria de pavimentos intertravados.

A substituição parcial do agregado miúdo por 5% de poeira e 4% de lodo na fabricação do concreto é possível, mantendo tanto as características técnicas necessárias para a boa qualidade dos blocos quanto a garantia de um eficiente tratamento dos contaminantes presentes nos resíduos, sem riscos de expor o ambiente à eventuais contaminações.

Conclui-se portanto, que os resíduos galvânicos apresentaram características e comportamento em matrizes de cimento que permitem classificá-los como resíduos sólidos industriais passíveis de serem utilizados como matérias-primas na indústria da construção civil, surgindo como alternativa de reaproveitamento e inertização de resíduos considerados perigosos para o ambiente, contribuindo também para a economia de toneladas de matérias-primas.

Contudo, para que a reutilização desses resíduos seja efetivamente realizada, deve haver um esforço conjunto entre universidade, indústrias de blocos intertravados e de indústrias galvânicas, para que as tecnologias desenvolvidas no meio acadêmico sejam utilizadas pela sociedade para a obtenção não só de benefícios econômicos, mas principalmente ambientais.

#### 6.1 Sugestões para trabalho futuros

São feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Elaboração de traços com a utilização de aditivos, tais como materiais pozolânicos, que proporcionem uma melhora nas características mecânicas dos blocos fabricados com os resíduos galvânicos, bem como a utilização de plastificantes;

- Realização do estudo sobre as propriedades físico-químicas e mecânicas dos blocos com adição dos resíduos à longo prazo;
- Realização de um estudo completo sobre a viabilidade econômica no que diz respeito à avaliação dos custos de gerenciamento dos resíduos galvânicos para a produção de blocos de concreto para pavimentação, bem como aceitação do produto pelos usuários;
- Possível avaliação da resistência à abrasão das peças de acordo com a norma ABNT NBR 9781 (2013);
- Avaliação da aplicação conjunta de poeira de jateamento e lodo galvânico em substituição parcial ao cimento e ao agregado miúdo na fabricação de blocos para pavimentação;
- Estudo da viabilidade de produção de blocos de concreto com a substituição parcial do agregado graúdo por resíduos galvânicos;
- Verificação da viabilidade técnica da utilização dos resíduos galvânicos na produção de concretos plásticos.

## CAPÍTULO VII

### 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CIMENTO PORTLAND. 2012. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/basico/basico-sobre-cimento>>. Acesso em: 04 ago. 2012.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, ABNT, 1992.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, ABNT, 1992.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9780**: Peças de concreto para pavimentação determinação da resistência a compressão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 1987.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

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

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**. Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**. Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**. Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, ABNT, 1992.

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15953**: Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução. Rio de Janeiro, 2011.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**. Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**. Agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2004**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/>>. Acesso em: 14 jul. 2011.
- ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2005**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/>>. Acesso em: 14 jul. 2011.
- ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2006**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/>>. Acesso em: 14 jul. 2011.
- ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2007**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/>>. Acesso em: 14 jul. 2011.
- ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil - 2008**. Disponível em: [http://www.abrelpe.org.br/download\\_panorama\\_2008.php](http://www.abrelpe.org.br/download_panorama_2008.php). Acesso: 19 ago. 2011.
- ADERNE, R. S. **Solidificação e estabilização de rejeito de curtume com cimento de alto forno**. 2012. Tese – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

- AGREDO, J. T.; SERNA, J. J. T.; GUTIÉRREZ, R. M. Reutilización de um residuo de la industria petroquímica como adición al cemento Portland. In: **Ingeniería y Ciencia**. V. 8, p. 141-156, 2012.
- AHMADI, B.; AL-KHAJA, W. Utilization of paper waste sludge in the building construction industry. In: **Resources, Conservation e Recycling**. V. 32, p. 105-113, 2001.
- ALTOE, S.P.S. **Estudo da potencialidade da utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e resíduos de pneus inservíveis na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2013. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2013.
- AMADEI, D. I. B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do município de Juranda/PR**. 2011. Dissertação - Departamento de Engenharia Civil, Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.
- AMBIENTE BRASIL. Acidentes ambientais. 2011. Disponível em: [http://www.ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/acidentes\\_ambientais.html](http://www.ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/acidentes_ambientais.html). Acesso em: 07 jul. 2013.
- ASAVAPISIT, S.; COSANAVIT, C. Solidification of the electroplating sludge using blended cements. In: **Suranaree J. Sci. Technol**. V. 11, p. 9-16, 2004.
- ASAVAPISIT, S.; CHOTKLANG, D. Solidification of electroplating sludge using alkali-activated pulverized fuel ash as cementitious binder. In: **Cement and Concrete Research**. V. 34, p. 349-353, 2004.
- ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 936 - Standard specification for solid concrete interlocking paving units**. Conshohocken, Pennsylvania, USA, 1996.
- ATLASINOX, 2012. Disponível em: <<http://atlasinox.com.br/txt.jateamento.html>>. Acesso em: 10 jul. 2012.
- BARBETTA, P.A; REIS, M.M; BORNIA, A.C. **Estatística para cursos de Engenharia e Informática**. ATLAS, São Paulo, 2004.
- BARROSO, T. R. **Estudo da atividade pozolânica e da aplicação em concreto de cinza do bagaço de cana-de-açúcar com diferentes características físicas e química**. 2011. Dissertação – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2011.

BARTH, E. F.; PERCIN, P. **Stabilization and solidification of hazardous wastes – Pollution Technology Review**. V. Park Ridge, Noyes Data, 1990.

BENATTI, C. T.; LUCAS, D. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. In: **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, ISSN 1981 – 9951. V. 1, n. 3, p. 405-418, set/dez 2008.

BENSON, R.E.; CHANDLER, H.W.; CHACEY, K. A. Hazardous waste disposal as concrete admixture. In: **Journal of Environmental Engineering**. V. 111, n.4, p. 441-447. 1986.

BERNARDES, A. M.; NÍQUEL, C. L. V.; SCHIANETZ, K.; SOARES, M. R. K.; SANTOS, M. K.; SHNEIDER, V. E. **Manual de orientações básicas para minimização de efluentes e resíduos da indústria galvânica**. V. 1, Porto Alegre, 2000.

BISHOP, P. L.; BROWN, T. M.; SHIVELY, W. E. Alkalinity releases and the leaching of heavy metals from stabilized/solidified wastes. In: **Studies in Environmental Science**. V. 29, p. 217-233, 1986.

BORGO, S. C. **Minimização e reciclagem de lodo galvânico e poeira de jateamento**. 2005. Dissertação – Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

BRADLEY, S. M.; HANNA, J. V.  $^{27}\text{Al}$  and  $^{23}\text{Na}$  MAS NMR and Powder X-ray Diffraction Studies of Sodium Aluminate Speciation and the Mechanistics of Aluminum Hydroxide Precipitation upon Acid Hydrolysis. In: **Journal of the American Chemical Society**. V.116, p. 7771 – 7783, 1994.

BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo, 1993.

BRASIL. **Resolução CONAMA N° 313, de 29 de outubro de 2002**. Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>>. Acesso em: 15 ago. 2011.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>. Acesso em 27 jun. 2011.

- BRASIL. **Planos Nacional de Resíduos Sólidos (2011) – versão preliminar para consulta pública.** Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>. Acesso em: 14 jul. 2011.
- BRITO, A. L. F. **Protocolo de avaliação de materiais resultantes da estabilização por solidificação de resíduos.** 2007. Tese – Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- CSA. CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **A231.2 – 95: Precast concrete pavers.** CSA, Rexdale, Ontario, Canadian, 1995.
- CHAUDHARY, R.; MALVIYA, R. Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: A review. In: **Journal of Hazardous Materials**, n. B137, p. 267-276, 2006. Disponível em: <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>. Acesso em: 30 nov. 2011.
- CHEAH, C. B.; RAMLI, M. The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: Na overview. In: **Resources, Conservation and Recycling**. V. 55, p. 669-685, 2011.
- CHEN, Q. Y.; TYRER, M.; HILLS, C. D.; YANG, X. M.; CAREY, P. Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: a review. In: **Waste Management**. V. 29, p. 390-403, 2009.
- CHEN, Y.; KO, M.; LAI, Y.; CHANG, J. Hydration and leaching characteristics of cement paste made from electroplating sludges. In: **Waste Management**. V. 31, p. 1257-1363, 2011.
- CHIDIAC, S. E.; MIHALJEVIC, S. N. Performance of dry cast concrete blocks containing waste glass powder or polyethylene aggregates. In: **Cement and Concrete Composites**. V. 33, p. 855-863, 2011.
- CIOFFI, R.; LAVORGNA, M.; SANTORO, L. Environmental and technological effectiveness of a process for the stabilization of a galvanic sludge. In: **Journal of Hazardous Materials**. V. 89, p. 165-175, 2002.
- CONNER, J.R. **Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes.** New York. Van Nostrand Reinhold, 1990.
- CONNER, J. R.; HOFFNER, S. L. A critical review of stabilization/solidification technology. In: **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**. V. 28, n°4, p.397-462, 1998.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto: estudo dos elementos e métodos de dimensionamento**. 2003. Tese - Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

DWECK, J.; ALBERONI, V. G.; SILVA, D. M.; YOKOYAMA, L. Uso da análise térmica diferencial não convencional em estudos de estágios iniciais de solidificação de rejeitos. In: **Anais do III Seminário sobre prevenção e controle da poluição e reciclagem de rejeitos**, p. 1-9, 2007.

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Use and disposal of municipal wastewater sludge**. Washington: EPA, 1984. (Report n. EPA 625/10-84-003).

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Stabilization/solidification of CERCLA and RCRA wastes**. EPA 625/6-89/022. Cincinnati, Ohio, 1989.

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods**. (SW-846). 3 edition, Washington, 1992. (SW-846). Disponível em:

<http://www.epa.gov/epawaste/hazard/testemethods/sw846/index.htm>. Acesso em: 20 de nov. de 2011.

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Solidification/Stabilization and its application to waste materials. National Technical Information Service**. Cincinnati, Ohio, 1993. Disponível em: <<http://www.cement.org/waste/pdfs/EPATEchnicalResourceDocument.pdf>>. Acesso em: 11 jul. 2012.

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Treatability studies for solidification/stabilization of contaminated material. Department of the Army**. U. S. Army Corps of Engineers, Washington D. C, 1995. Disponível em: <<http://www.cement.org/waste/pdfs/USACETreatabilityGuide.pdf>>. Acesso em: 11 jul. 2012.

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 3052: Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices**, 1996

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Technology performance review: Selecting and using Solidification/stabilization treatment for site remediation**. Nov. 2009. Cincinnati, OH. Disponível em: <<http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r09148/600r09148.pdf>>. Acesso em: 13 de dez. de 2011.

- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN BS EN – 1338: Concrete paving blocks, requirements and tests methods**. Brussels, Belgium, 2003.
- FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. 2007. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- FRANCO, J. M. **Produção de blocos de concreto para pavimentação (BCP) utilizando resíduos de galvanoplastia**. 2011. Dissertação – Departamento de Engenharia Civil, Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.
- GAILIUS, A.; VACENOVSKA, B.; DROCHYTKA, R. Hazardous wastes recycling by solidification/stabilization method. In: **Materials Science**. V. 16, p. 165-169, 2010.
- GENCEL, O.; OZEL, C.; KOKSAL, F.; ERDOGMUS, E.; BARRERA-MARTÍNEZ, G.; BROSTOW, W. Properties of concrete paving blocks made with waste marble. In: **Journal of Cleaner Production**. V. 21, p. 62-70, 2012.
- GOMES, A. C. P. **Caracterização de resíduos sólidos das indústrias de cerâmicas artísticas de Porto Ferreira, SP**. 2003. Dissertação – Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.
- GRANZOTO, L. **Concreto com adições de borracha: uma alternativa ecológicamente viável**. 2010. Dissertação – Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.
- GUNTHER, W. M. R. **Resíduos sólidos no contexto da saúde ambiental**. 2008. Tese (livre docente) – Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.
- HAGO, A. W. HASSAN, A. W.; AL RAWAS, A.; TAHA, R.; AL-HADIDI, S. Characterization of concrete blocks containing petroleum-contaminated soils. In: **Construction and Building Materials**. V. 21, p. 952-957, 2007.
- HENKAL, E. E.; HEGAZI, W. S.; KISHAR, E. A.; MOHAMED, M. R. Solidification/stabilization of Ni (II) by various cement pastes. In: **Construction and Building Materials**. V. 25, p. 109-114, 2011.
- HENKAL, E. E.; KISHAR, E. A.; HEGAZI, W. S.; MOHAMED, M. R. Immobilization of Co (II) ions in cement pastes and their effects on hydration characteristics. In: **Journal of Material Science Technology**. V. 27, p. 74-80, 2011a.

HILLS, C.D., SOLLARS, C.J., PERRY, R. A calorimetric and microstructural study of solidified toxic wastes – part 2: a model for poisoning of OPC hydration. In: **Waste Management**. V. 14, n.7, p.601–612, 1994.

HOOD, R. S. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2006. Dissertação – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

INFOJOIAS, 2012. Disponível em: <[http://www.infojoia.com.br/news\\_portal/noticia\\_9081](http://www.infojoia.com.br/news_portal/noticia_9081)>. Acesso: 09 de jul. 2012.

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA. **Que soluções para o tratamento dos Resíduos Sólidos Industriais?** Departamento de Engenharia Química. Lisboa, Portugal. Disponível em: <<http://www.deetc.isel.ipl.pt/jetc05/CCTE02/papers/finais/quimica/52.PDF>>. Acesso em 14 Jul. 2011.

INTERCEMENT, 2011. Disponível em: <<http://www.intercement.com/pt>>. Acesso em: 15 ago. 2012.

INTERPAVI, 2012. Disponível em: <<http://www.interpavi.com.br/brazil/produto.htm>>. Acesso em: 01 de ago. 2012

ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A. Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. In: **Waste Management**. V. 29, p. 655-659, 2009.

JAIN, N.; GARG, M. Effect of Cr (IV) on the hydration behavior of marble dust blended cement: Solidification, leachability and XDR analyses. In: **Construction and Building Materials**. V. 22, p. 1851-1856. 2008.

JAMES, B.R. The challenge of remediating chromium-contaminated soil. In: **Environmental Science and Technology**. V.30, 248A–251A, 1996.

KATSIOTI, M.; KATSIOTIS, N.; ROUNI, G.; BAKIRTZIS, D.; LOIZIDOU, M. The effect of bentonite/cement mortar for the stabilization/solidification of sewage sludge containing heavy metals. In: **Cement e Concrete Composites**. V. 30, p. 1013-1019, 2008.

KAUR, G.; SIDDIQUE, R.; RAJOR, A. Micro-structural and metal leachate analysis of concrete made with fungal treated waste foundry sand. In: **Construction and Building Materials**. V. 38, p. 94-100, 2013.

KERN, A. P. **Estudo da viabilidade da incorporação de resíduos de contrafortes de calçados em matriz de gesso para uso como material de construção civil**. 1999.

Dissertação - Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

KRAEMER, M. E. P. A questão ambiental e os resíduos industriais. In: **XXV ENEGEP**, 2005. Porto Alegre, RS, Brasil.

KUCHAR, D. **Sulfidation treatment of plating sludges and molten incineration fly ashes for recovery of heavy metals**. Dissertation – Doctor in Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Nagoya University, Nagoya, 2007.

LAM, C. S.; POON, C. S.; CHAN, D. Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass – ASR consideration. In: **Cement and Concrete Composities**. V. 29, p. 616-625, 2007.

LANGE, L.C.; SCHWABE, W.S; HILLS, C.D. A tecnologia da estabilização/solidificação aplicada ao tratamento de resíduos industriais. In: **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**. V.3. n.1, p.55-66,1998.

LEE, G.; POON, C. S.; WONG, Y. L.; LING, T, C. Effexts of recycle fine glass aggregate on the properties of dry-mixed concrete blocks. In: **Construction adn Building Materials**. V. 38, p. 638-643, 2013.

LOU, H. H.; HUANG, Y. Electroplating, in **Encyclopedia of Chemical Processing**, S. Lee (ed.), Marcel Dekker, New York, NY, 2006.

LU, J.C.S; EICHENBERGER, B; STEARNS, R.J. **Leachate from municipal landfills production and mangement**. Noyes Publications, 1985.

MACKAY, M.; EMERY, J. **Stabilization/solidification of contaminated soils and sludges using cementitious systems**. Cement Industry Solutions to Waste Management, Proceedings, Calgary, 1992.

MASSARDIER, V ; MOSZKOWICZ, P ; TAHA, M. Flay ash stabilization/solidification using polymerconcrete double matrices. **Envirinmentyal Polymers Journal**. v.33, n.7, p.1081-1086, 1997.

MEDINA, C.; SANCHEZ DE ROJAS, M. I.; FRIAS, M. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. In: **Cement e Concrete Composities**. V. 34, p. 48-54, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª ed. IBRACON, 2008.

- MELCHERT, M. B. M. **Solidificação e estabilização de resíduos de catalisadores contendo níquel e alumínio em cimento Portland**. 2012. Tese – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- MEYER, M. F.; PONTES, J. C.; SOUZA, J. B.; MARQUES, L. Estudo preliminar dos resíduos sólidos industriais no Rio Grande do Norte. **In: V Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica – CONNEPI. 2010.** Maceió, AL, Brasil.
- MICROESFERA, 2012. Disponível em: <<http://www.microesfera.com.br/?products=microesfera-de-vidro>>. Acesso em: 10 jul. 2012.
- MISSIAGGIA, R. R. **Gestão de resíduos sólidos industriais**. 2002. Dissertação-Mestrado em Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- MONTANHEIRO, T. J., YAMAMOTO, J. K., KIHARA, Y. Proposta de Pré-Qualificação Pozolânica de Materiais Geológicos: Difratomia de Raios X como Método Alternativo. **In: Revista do Instituto Geológico**, São Paulo: 24(1/2), p. 1-9, 2003.
- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 5ª ed. Editora LCT, Rio de Janeiro, 2013.
- MOURA, C. L. **Íons metálicos (Al, Fe, Mn e Pb) associados a aterros (sanitário e industrial) no município de Tremembé/SP**, 2008. Tese – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- NASCIMENTO, T. C. F.; MOTHÉ, C.G. Gerenciamento de resíduos sólidos industriais. **In: Revista Analytica**, n. 27, Fevereiro/Março 2007.
- NAVARRO-BLASCO, A.; DURAN, A.; SIRERA, R.; FERNÁNDEZ, J. M.; ALVAREZ, J. I. Solidification/stabilization of toxic metals in calcium aluminat cement matrices. **In: Journal of Hazardous Materials**. V. 260, p. 89-103. 2013.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ª Edição, Editora Pini, 1997.
- NORMA MERCOSUL. **NM 23**. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica, 2000.
- OLIVEIRA, A. L. de. **Contribuição para a Dosagem e Produção de Peças de Concreto para Pavimentação**. 2004. Tese - Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

- OLIVEIRA, J. M.; CUNHA, C. O. M. **Dossiê Técnico – Minimização de efluentes e resíduos na indústria galvanizada**. SENAI/CNTL. 2007.
- ORTEGO, J.D.; JACKSON, S.; YU, G. S. Solidification of hazardous substances – a TG and FTIR study of Portland cement containing metal nitrates. In: **Journal of Environmental Science and Health**. V. A4, p. 589-602, 1989.
- ORTIGÃO, J. A . R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 3ª ed. Terratek, 2007.
- OZKAN, O.; YUKSEL, I. Studies of mortars containing waste bottle glass and industrial by-products. In: **Construction and Building Materials**. V. 22, p. 1288-1298. 2008.
- PABLOS, J. M. **Estudo para a reutilização do resíduo sólido constituído pelas areias de fundição aglomeradas com argila, através da técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland, para aplicação no setor da construção civil**. 2008. Tese - Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008
- PAGNUSSAT. D. T. **Utilização da escória granulada de fundição em blocos de concreto para pavimentação**. 2004. Dissertação - Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- PAIXÃO, J. F. **Caderno de Diagnósticos – Resíduos Sólidos Industriais**. Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas (IPEA), 2011. Disponível em: <[http://www.cnrh.gov.br/pnrs/documentos/cadernos/05\\_CADDIAG\\_Res\\_Sol\\_Industriais.pdf](http://www.cnrh.gov.br/pnrs/documentos/cadernos/05_CADDIAG_Res_Sol_Industriais.pdf)>. Acesso em: 30 ago. 2012.
- PARK, S. B.; LEE, B. C.; KIM, J. H. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. In: **Cement and Concrete Research**. V. 34, p. 2181-2189. 2004.
- PEREIRA, D. A. **Gestão e tratamento dos resíduos sólidos industriais na região sul do Estado do Rio de Janeiro**. Dissertação - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.
- PETTERMANN, R. **Avaliação do desempenho de blocos de concreto para pavimentação com metacaulim e sílica ativa**. Monografia - Especialização em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

- PINTO, C. A. **Estudo da estabilização por solidificação de resíduos contendo metais pesados**. 2005. Tese – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- PINTO, C. A.; BUCHLER, P. M.; DWECK, J. Evaluation of S/S process of tannery waste in cement by structural and mechanical analysis. In: **Material Science Forum**. V. 660-661, p. 1130-1136, 2010.
- PONTES, H. **Tratamento químico de efluentes de galvanoplastia**. Departamento de Engenharia Química. Paraná, 2000.
- POON, C. S.; PETERS, D. J.; PERRY, R.; BARNES, P.; BARKER, A. P. Mechanisms of metal stabilization in cement based fixation processes. In: **Science of the Total Environment**. V. 41, p. 55-71, 1985.
- POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- REDDI, L.N; INYANG, H.I. **Geoenvironmental Engineering: Principles and Applications**. New York . Basel. Editora. Marcel Dekker, Inc. 2000, 494p.
- ROCHA, G. G. N. **Caracterização Microestrutural do Metacaulim de Alta Reatividade**. 2005. Dissertação - Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- SAFEPIGMENT, 2012. Disponível em: <[http://www.safepigment.com/pdf/DS\\_GlassBead.pdf](http://www.safepigment.com/pdf/DS_GlassBead.pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2012.
- SENTHAMARAI, R. M.; DEVADAS MANOHARAN, P.; GOBINATH, D. Concrete made from ceramic industry waste; Durability properties. In: **Construction and Building Materials**. V. 25, p. 2413-2419, 2011.
- SESI, SERVIÇO SOCIAL DA INDÚSTRIA. 2007. **Manual de segurança e saúde no trabalho: Indústria Galvânica**. Coleção Manuais, SESI-SP, 2007. Disponível em: <http://www.sesisp.org.br/home/2006/saude/manualgalvanica.pdf>>. Acesso em 9 dez. 2011.
- SHI, C.; SPENCE, R. Designing of cement-based formula for solidification/stabilization of hazardous, radioactive, and mixed wastes. In: **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**. V.34, n.4, p. 391-417. 2004.

- SHI, C.; ZHENG, K. A review on the use of waste glasses in the production o cement and concrete. In: **Resources Conservation e Recycling**. V. 52, p. 234-247, 2007.
- SHINZATO, M. C.; HYPOLITO, R. Solid waste from aluminum recycling process: characterization and reuse of its economically valuable constituents. In: **Waste Management**. V. 25, p. 37-46, 2005.
- SIDDIQUE, R; SINGH, G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. In: **Resources Conservation and Recycling**. V. 55, p. 885-892, 2011.
- SIMIÃO, J. **Gerenciamento de resíduos sólidos industriais em uma empresa de usinagem sobre o enfoque da produção mais limpa**. 2011. Dissertação - Mestrado em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- SINGH, G.; SIDDIQUE, R. Abrasion resistance and strength properties of concrete containing waste foundry sand (WFS). In: **Construction and Building Materials**. V. 28, p. 421-426, 2012.
- SOPHIA, A. C.; SWAMINATHAN, K. Assessment of the mechanical stability and chemical leachability of immobilized electroplating waste. In: **Chemosphere**. V. 58, p. 75-82, 2005.
- SOUTO, J. M. F. **Avaliação do desempenho da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na produção de concreto**. 2010. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.
- SPENCE, R.D; SHI,C. **Stabilization and solidification of hazardous, radioactive and mixed wastes**. Boca Raton, Florida. Ed. CRC Press. 2005.
- STEGEMANN, J. A.; BUENFELD, N. R. Prediction of unconfined compressive strenght of cement paste containing industrial wastes. In: **Waste Management**. V. 23, p. 321-332. 2003.
- TELOEKEN, A. C. **Utilização do lodo galvânico como matéria-prima em cerâmica vermelha: obtenção, caracterização de propriedades tecnológicas e aspectos ambientais**. 2011. Dissertação – Pós-Graduação de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- TOCCHETO, M. R. L. **Implantação de gestão ambiental em grandes empresas com atividade galvânica no Rio Grande do Sul**. 2004. Tese – Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

- TOCCHETTO, M. R. L. **Gerenciamento de resíduos sólidos industriais**. Apostila – Especialização em Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos e Líquidos - Universidade Federal de Goiás, Goiânia – Go, 2010.
- TOMAZ, E. **Preservação do Meio Ambiente – Resíduos**. Apostila Versão 01. Departamento de Processos Químicos. Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP. 2006. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/57053099/Apostila-Residuos-EQ861>>. Acesso em: 16 jul. 2012.
- TOPÇU, I. B.; CANBAZ, M. **Properties of concrete containing waste glass**. In: **Cement and Concrete Research**. V. 34, p. 267-274. 2004.
- TUAN, B. L. A.; HWANG, C.; LIN, K.; CHEN, Y.; YOUNG, M. Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete. In: **Construction and Building Materials**. V. 47, p. 334-339, 2013.
- UYGUNOGLU, T.; TOPÇU, I. B.; GENÇEL, O.; BROSTOW, W. The effect of fly ash content and types of aggregate on the properties of pre-fabricated concrete interlocking blocks (PCIBs). In: **Construction and Building Material**. V. 30, p. 180-187, 2012.
- VIECILLI, F. A. **Influência da utilização dos endurecedores superficiais cimentícios na resistência à abrasão de pisos industriais de concreto**. 2004. Dissertação – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- WATANABE, F. A. **Estudo sobre a utilização de areia de fundição residual como agregado na construção de pavimentos de concreto**. (2004). Dissertação – Pós-graduação em Ciência e Engenharia de materiais, Universidade de Santa Catarina, Joinville, 2004.
- WILES, C. C. A review of solidification/stabilization technology. In: **Journal of Hazardous Materials**. V. 14, p. 5-21. 1987.
- YOUSUF, M.; MOLLAH, A.; VEMPATI, R. K.; LIN, T. C.; COCKE, D. L. The interfacial chemistry of solidification/stabilization of metals in cement and pozzolanic material systems. In: **Waste Management**, V.15, N. 2, 137-148. 1995.
- YOUSUF, M.; MOLLAH, A.; LIANG, J.; COCKE, D. L. Speciation of silver in cementitious environment. In: **Journal of Hazardous Materials**. V. 63, p. 163-177. 1998.
- ZAIN, M. F. M.; ISLAM, N. M.; RADIN, S. S.; YAP, S. G. Cement-based solidification for the safe disposal of blasted copper slag. In: **Cement and Concrete Composites**. V. 26, p. 845-851. 2004.

**APÊNDICE A – RESULTADOS GERAIS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO**

Tabela A.1 – Resultados gerais dos ensaios de resistência à compressão dos blocos fabricados com poeira de jateamento aos 28 dias de cura (escala piloto)

<i>Peça</i>	<i>Referência</i>		<i>2%</i>	
	<i>Resistência (MPa)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>Resistência (MPa)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>
1	31,61	-1,67	34,70	-1,70
2	37,01	0,37	36,55	-0,32
3	38,17	0,81	37,86	0,66
4	35,47	0,21	38,40	1,06
5	38,94	1,10	37,78	0,60
6	35,00	-0,39	36,55	-0,32
Resistência média ( $f_p$ )	36,03		36,97	
Resistência carac. ( $f_{pk}$ )	33,60		35,74	
Desvio Padrão	2,64		1,34	
	<i>3%</i>		<i>4%</i>	
<i>Peça</i>	<i>Resistência (MPa)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>Resistência (MPa)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>
1	40,09	0,73	33,92	-0,17
2	30,38	-1,42	29,30	-1,69
3	39,01	0,49	34,23	-0,06
4	41,94	1,14	37,01	0,85
5	36,78	0,00	38,01	1,18
6	32,54	-0,94	34,08	-0,12
Resistência média ( $f_p$ )	36,70		34,43	
Resistência carac. ( $f_{pk}$ )	32,64		31,63	
Desvio Padrão	4,51		3,04	
	<i>5%</i>		<i>10%</i>	
<i>Peça</i>	<i>Resistência (MPa)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>Resistência (MPa)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>
1	31,06	-0,96	22,36	-0,46
2	33,77	-0,19	29,14	0,71
3	31,07	-0,96	16,81	-1,42
4	39,63	1,47	33,54	1,47
5	33,39	-0,30	25,29	0,04
6	37,78	0,94	23,13	-0,33
Resistência média ( $f_p$ )	34,45		25,05	
Resistência carac. ( $f_{pk}$ )	31,20		19,72	
Desvio Padrão	3,53		5,79	

Tabela A.2 – Resultados gerais dos ensaios de resistência à compressão dos blocos fabricados com lodo galvânico aos 28 dias de cura (escala piloto)

<i>Peça</i>	<i>Referência</i>		<i>2%</i>	
	<i>Resistência (MPa)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>Resistência (MPa)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>
1	31,61	-1,67	27,91	-1,52
2	37,01	0,37	34,08	-0,01
3	38,17	0,81	35,16	0,25
4	35,47	0,21	39,09	1,22
5	38,94	1,10	37,32	0,78
6	35,00	-0,39	31,15	-0,73
Resistência média ( $f_p$ )	36,03		34,12	
Resistência carac. ( $f_{pk}$ )	33,60		30,36	
Desvio Padrão	2,64		4,08	
	<i>3%</i>		<i>4%</i>	
<i>Peça</i>	<i>Resistência (MPa)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>Resistência (MPa)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>
1	25,67	-1,52	34,85	0,06
2	29,30	-0,88	34,08	-0,17
3	37,63	0,59	31,15	-1,05
4	39,78	0,98	37,78	0,94
5	38,55	0,76	39,09	1,33
6	34,70	0,08	30,99	-1,10
Resistência média ( $f_p$ )	34,27		34,66	
Resistência carac. ( $f_{pk}$ )	29,09		31,59	
Desvio Padrão	5,64		3,33	
	<i>5%</i>		<i>10%</i>	
<i>Peça</i>	<i>Resistência (MPa)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>Resistência (MPa)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>
1	24,06	-0,72	22,36	0,52
2	26,99	0,06	13,11	-0,76
3	31,30	1,22	8,56	-1,38
4	31,23	1,20	17,12	-0,20
5	23,36	-0,91	28,99	1,43
6	23,59	-0,85	21,43	0,39
Resistência média ( $f_p$ )	26,75		18,59	
Resistência carac. ( $f_{pk}$ )	23,32		11,92	
Desvio Padrão	3,73		7,26	

Tabela A.3 – Resultados gerais dos ensaios de resistência à compressão dos blocos fabricados com resíduos galvânicos (escala industrial)

Peça	Resistência à compressão (MPa)					
	Referência					
	7 dias	Teste Chauvenet	14 dias	Teste Chauvenet	28 dias	Teste Chauvenet
1	8,94	-1,77	5,86	-1,67	7,94	-1,51
2	9,71	-1,38	8,25	-1,08	7,99	-1,50
3	11,18	-0,64	8,79	-0,95	10,79	-0,47
4	12,80	0,18	10,79	-0,46	11,13	-0,34
5	12,49	0,03	12,34	-0,08	11,26	-0,30
6	14,50	1,04	14,65	0,48	12,57	0,19
7	14,96	1,28	15,42	0,67	13,88	0,67
8	13,57	0,57	15,88	0,79	14,65	0,95
9	13,72	0,65	16,96	1,05	14,96	1,07
10	12,40	0,03	17,73	1,24	15,42	1,24
Resistência média ( $f_p$ )	12,44		12,67		12,06	
Resistência carac. ( $f_{pk}$ )	10,70		9,06		9,66	
Desvio Padrão	1,97		4,05		2,72	
Peça	Resistência à compressão (MPa)					
	Poeira de jateamento 5%					
	7 dias	Teste Chauvenet	14 dias	Teste Chauvenet	28 dias	Teste Chauvenet
1	21,43	-1,23	20,51	-0,86	21,97	-0,94
2	24,36	-0,19	22,82	-0,32	22,05	-0,92
3	25,29	0,14	23,36	-0,20	22,36	-0,84
4	25,44	0,20	23,59	-0,14	22,67	-0,76
5	25,91	0,36	25,60	0,33	22,74	-0,74
6	26,06	0,42	25,83	0,38	25,52	-0,01
7	26,29	0,50	26,21	0,47	27,06	0,39
8	26,99	0,74	29,38	1,21	29,30	0,97
9	28,37	1,24	29,61	1,27	29,38	0,99
10	18,74	-2,18	15,11	-2,13	32,61	1,84
Resistência média ( $f_p$ )	25,57		25,21		25,57	
Resistência carac. ( $f_{pk}$ )	23,87		22,54		22,18	
Desvio Padrão	1,92		3,00		3,83	
Peça	Resistência à compressão (MPa)					
	Lodo galvânico 4%					
	7 dias	Teste Chauvenet	14 dias	Teste Chauvenet	28 dias	Teste Chauvenet
1	9,56	-1,57	6,94	-1,58	11,10	-1,25

2	12,03	-0,83	8,64	-1,13	11,33	-1,16
3	12,64	-0,65	10,18	-0,73	12,64	-0,61
4	14,03	-0,24	10,56	-0,63	12,64	-0,61
5	14,26	-0,17	12,88	-0,02	12,72	-0,58
6	15,03	0,06	13,57	0,16	13,72	-0,16
7	15,57	0,23	15,03	0,55	15,96	0,77
8	15,88	0,32	15,96	0,79	16,35	0,93
9	17,04	0,66	17,89	1,30	17,19	1,28
10	22,13	2,18	17,89	1,30	17,42	1,38
Resistência média ( $f_p$ )	14,01		12,95		14,11	
Resistência carac. ( $f_{pk}$ )	11,97		9,59		11,99	
Desvio Padrão	2,29		3,81		2,40	

**APÊNDICE B – RESULTADOS GERAIS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE  
ÁGUA DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO**

Tabela A.4 – Resultados gerais dos ensaios de absorção de água dos blocos fabricados com poeira de jateamento aos 28 dias de cura (escala piloto)

<i>Peça</i>	<i>Referência</i>		<i>2%</i>	
	<i>Absorção de água (%)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>Absorção de água (%)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>
1	5,33		4,05	
2	6,13		4,05	
Absorção média	5,73		4,05	
Desvio Padrão	0,57		0,00	
	3%		4%	
<i>Peça</i>	<i>Absorção de água (%)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>Absorção de água (%)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>
1	5,10		4,58	
2	4,14		4,43	
Absorção média	4,62		4,50	
Desvio Padrão	0,67		0,10	
	5%		10%	
<i>Peça</i>	<i>Absorção de água (%)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>Absorção de água (%)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>
1	4,22		6,29	
2	4,88		5,56	
Absorção média	4,55		5,92	
Desvio Padrão	0,47		0,52	

Tabela A.5 – Resultados gerais dos ensaios de absorção de água dos blocos fabricados com lodo galvânico aos 28 dias de cura (escala piloto)

<i>Peça</i>	<i>Referência</i>		<i>2%</i>	
	<i>Absorção de água (%)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>Absorção de água (%)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>
1	5,33		8,70	
2	6,13		7,51	
Absorção média	5,73		8,10	
Desvio Padrão	0,57		0,84	
	3%		4%	
<i>Peça</i>	<i>Absorção de água (%)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>Absorção de água (%)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>
1	7,59		6,13	
2	8,81		8,86	
Absorção média	8,20		7,50	
Desvio Padrão	0,86		1,93	

<i>Peça</i>	5%		10%	
	<i>Absorção de água (%)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>Absorção de água (%)</i>	<i>Teste Chauvenet</i>
1	8,45		13,08	
2	10,49		12,88	
Absorção média	9,47		12,98	
Desvio Padrão	1,44		0,14	

Tabela A.6 – Resultados gerais dos ensaios de absorção de água dos blocos fabricados com resíduos galvânicos (escala industrial)

<i>Peça</i>	<i>Absorção de água (%)</i>					
	<i>Referência</i>					
	<i>7 dias</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>14 dias</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>28 dias</i>	<i>Teste Chauvenet</i>
1	13,86	0,37	13,53	0,85	13,40	1,35
2	14,43	0,90	12,53	-1,43	10,82	0,03
3	13,64	0,16	13,40	0,54	10,07	-0,35
4	11,93	-1,42	13,17	0,02	8,77	-1,02
Absorção média	13,46		13,16		10,76	
Desvio Padrão	1,08		0,44		1,95	

<i>Peça</i>	<i>Absorção de água (%)</i>					
	<i>5% poeira de jateamento</i>					
	<i>7 dias</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>14 dias</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>28 dias</i>	<i>Teste Chauvenet</i>
1	9,57	1,12	8,51	1,23	7,62	1,47
2	8,04	-0,14	7,16	-0,21	5,44	-0,37
3	6,67	-1,28	7,49	0,15	5,01	-0,74
4	8,57	0,30	6,24	-1,18	5,44	-0,37
Absorção média	8,21		7,35		5,88	
Desvio Padrão	1,21		0,94		1,18	

<i>Peça</i>	<i>Absorção de água (%)</i>					
	<i>4% lodo galvânico</i>					
	<i>7 dias</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>14 dias</i>	<i>Teste Chauvenet</i>	<i>28 dias</i>	<i>Teste Chauvenet</i>
1	13,86	0,81	11,03	-0,22	8,92	-0,40
2	9,40	-0,82	9,66	-1,13	8,99	-0,36
3	9,17	-0,90	13,33	1,30	8,38	-0,72
4	14,14	0,92	11,43	0,04	12,11	1,48
Absorção média	11,64		11,36		9,60	
Desvio Padrão	2,73		1,51		1,70	

## ANEXO A

**CRITÉRIO DE CHAUVENET PARA REJEIÇÃO DE DADOS**

O critério de *Chauvenet* estabelece que uma determinada leitura pode ser rejeitada se a probabilidade de obter um desvio particular em relação à média for menor que  $1/2N$ , onde  $N$  é o número de medições realizadas.

A probabilidade de um determinado desvio  $x - \mu$  ocorrer é dada por:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (\text{A.1})$$

Definindo o desvio de uma medida como:

$$d = x_{susp} - \bar{x}$$

Onde  $x_{susp}$  é a medida suspeita em questão, pelo critério de *Chauvenet*, o máximo desvio aceitável para uma amostra formada por  $N$  pontos, é dado por:

$$\frac{1}{2N} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_{\max}}{\sigma}\right)^2\right] \quad (\text{A.2})$$

Caso  $d > d_{\max}$ , o ponto em questão pode ser rejeitado. A Tabela A.7 apresenta valores para a razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão, para diferentes valores de  $N$ , obtidos da expressão acima.

Tabela A.7 - Valores para a razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão, para diferentes valores de  $N$

No. de Medidas (N)	$d_{\max}/\sigma$
2	1,15
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81
500	3,29
1000	3,48

Para eliminar pontos ruins seguindo o critério de *Chauvenet*, procedemos da seguinte forma:

- Mede-se a variável um número  $N$  de vezes e estima-se média e desvio padrão da distribuição;

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_1^N x_i, \quad \sigma = \left[ \frac{1}{N-1} \sum (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.3})$$

- Calcula-se o desvio entre cada medida e a média dividindo-se o resultado por  $\sigma$ ;

$$\frac{d_i}{\sigma} = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (\text{A.4})$$

- Usando um número de leituras  $N$ , comparar o valor de  $d_i/\sigma$  com  $d_{\max}/\sigma$ . Se for maior, rejeita-se o ponto e recalcula-se a média e o desvio. O critério somente deve ser aplicado uma única vez à distribuição.

## ANEXO B

**ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM UM FATOR**

A análise de variância (ANOVA) visa verificar se existe diferença significativa entre as médias dos tratamentos e se os fatores ou níveis do tratamento exercem influência em alguma variável dependente. Dessa forma permite que vários grupos sejam comparados a um só tempo, esses fatores podem ser de origem qualitativa ou quantitativa, mas a variável dependente deverá sempre ser contínua. O teste é paramétrico (variável de interesse deve ter distribuição normal) e os grupos devem ser independentes.

A Tabela A.8 apresenta a ANOVA para comparar as composições ou tratamentos.

Tabela A.8 – ANOVA do experimento para comparar o efeito dos tratamentos

<i>Fonte de variação</i>	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Soma dos quadrados</i>	<i>Média quadrática</i>	<i>F</i>	<i>Pvalor</i>
<i>Tratamento</i> ( <i>composições</i> )	$k - 1$	$SQ_{\text{tratamento}}$	$MQ_{\text{tratamento}}$	$MQ_{\text{tratamento}} / MQ_{\text{erro}}$	** ou *
<i>Erro residual</i>	$n - k$	$SQ_{\text{erro}}$	$MQ_{\text{erro}}$		
<i>Total</i>	$k - 1$	$SQ_{\text{total}}$			

\*\* : significativo ao nível de 1% de probabilidade, \* : significativo ao nível de 5% de probabilidade, k: número de tratamentos ou composições, n: número de observação (MONTGOMERY e RUNGER, 2013).

A Tabela A.8 mostra que se pode encontrar um valor P para a estatística teste, conforme critério de decisão:

- Se o valor P for  $< 0,01$  ou  $0,05$  ( $\alpha$ ) indica que as médias dos tratamentos são significativamente diferentes,
- Se o valor P for  $> 0,01$  ou  $0,05$ , indica que as médias dos tratamento não são significativamente diferentes.

## ANEXO C

### *TESTE DE TUKEY*

Quando a hipótese nula  $H_0$  é rejeitada na ANOVA, ou seja, valor  $P < \alpha$ , sabemos que algumas das médias dos tratamentos ou níveis dos fatores são diferentes. Entretanto, a ANOVA não identifica quais médias são diferentes. Métodos para investigar isso são chamados de métodos de comparações múltiplas (MONTGOMERY e RUNGER, 2013). O Teste de Tukey para comparação múltipla é um dos mais utilizados e testa todo e qualquer contraste entre das médias, porém não permite comparar grupos de médias entre si.

O teste baseia-se no cálculo da diferença mínima significativa (d.m.s)  $\Delta$ . A estatística teste é dada da seguinte forma:

$$\Delta = q \sqrt{\frac{QMRes}{r}} \quad (A.5)$$

Em que:

q: amplitude total studentizada (tabelado, função do número de tratamento, e dos graus de liberdade dos resíduos)

QMRes: quadrado médio do resíduo

r: número de repetições

Em um teste de comparação múltipla entre médias, também deve-se determinar um nível de significância  $\alpha$  para o teste, geralmente utiliza-se o nível de 5% ou 1% de significância. De acordo com o Teste de Tukey, duas médias são estatisticamente diferentes todas as vezes que o valor absoluto da diferença entre elas for maior ou igual do que a diferença mínima significativa (d.m.s).

## ANEXO D

***CORRELAÇÃO LINEAR, DIAGRAMA DE DISPERSÃO E COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO***

Em teoria de probabilidade e estatística, correlação linear indica a força e a direção do relacionamento entre duas variáveis aleatórias. No uso estatística geral, a correlação se refere a medida da relação entre duas variáveis, embora a correlação não implique causalidade. Neste sentido geral existem vários coeficientes medindo o grau de correlação, adaptados à natureza dos dados.

A Figura A.1 apresenta um modelo padrão de como foram apresentados os resultados para a análise de correlação. Para visualizar como as duas variáveis apresentaram-se correlacionadas foram construídos diagramas de dispersão, onde os valores das variáveis foram representados por pontos em um sistema cartesiano.

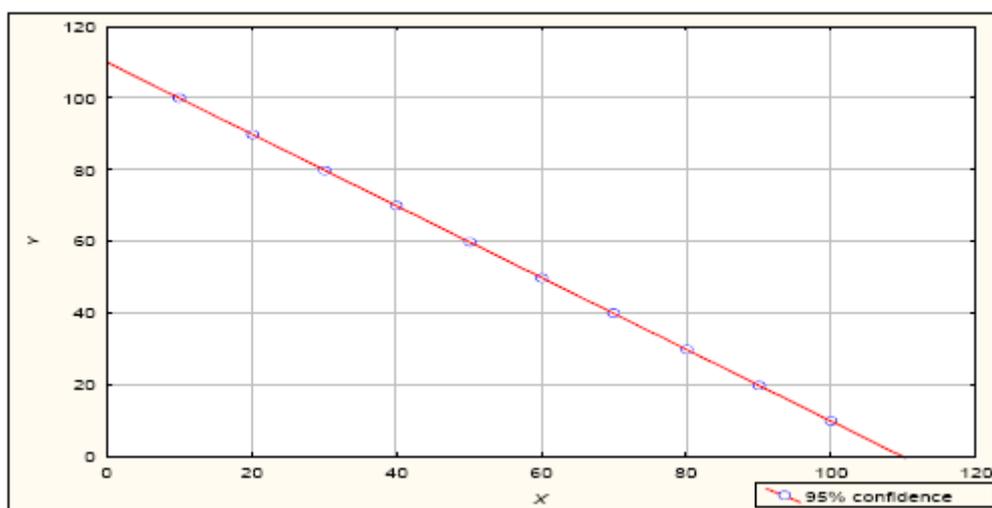


Figura A.1 – Diagrama de dispersão de  $n$  observações para as variáveis em estudo  
(BARBETTA *et al.*, 2004)

***Construção do coeficiente de correlação das variáveis***

O comportamento conjunto das duas variáveis foi medido pelo coeficiente de correlação representado por  $r$ , sendo definido pela equação (A.6):

$$r = \frac{n\sum(x_i \cdot y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \cdot \sqrt{n\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (\text{A.6})$$

Em que:

n: tamanho da amostra

x: relacionado ao critério de avaliação (propriedades mecânicas, físicas e de imobilização de contaminantes)

y: relacionado ao critério de avaliação (propriedades mecânicas, físicas e de imobilização de contaminantes)

### ***Interpretação do coeficiente de correlação***

O valor do coeficiente de correlação ( $r$ ) deve compreender o intervalo de -1 a 1. O valor -1 indica uma correlação linear negativa e o valor 1 indica uma correlação linear positiva. O valor de  $r$  é tão mais próximo de 1 (ou -1) quanto mais forte for a correlação nos dados observados entre as variáveis  $x$  e  $y$ . Teremos  $r = +1$  se os pontos estiverem exatamente sobre uma reta ascendente (correlação positiva). Por outro lado, teremos  $r = -1$  se os pontos estiverem exatamente sobre uma reta descendente (correlação negativa perfeita). Se não houver correlação,  $r$  assumirá um valor próximo de 0 (zero) (MONTGOMERY e RUNGER, 2013).

O coeficiente de correlação é um número usado para classificar a correlação da seguinte forma: perfeita:  $r = 1$ , forte:  $r \geq 0,75$ ; média:  $r \geq 0,5$  e  $< 0,75$ ; fraca:  $r < 0,5$  e inexistente  $r = 0$ . Além de determinar o coeficiente de correlação ( $r$ ), foi realizado também o teste de significância sobre  $r$  aliado com o respectivo tamanho da amostra  $n$ , ao nível de significância  $\alpha = 0,01$  de acordo com Barbetta *et al.*(2004) e Brito (2007), visando determinar se realmente existe correlação linear entre as variáveis por meio dos seguintes critérios de decisão:

- Se o valor de  $r$  encontrado for  $<$  do que o coeficiente de *Pearson*  $r$  tabelado ao nível de 0,01 não haverá correlação entre as variáveis,
- Se o valor de  $r$  encontrado for  $>$  do que o coeficiente de *Pearson*  $r$  tabelado ao nível de 0,01 haverá correlação entre as variáveis.

A Tabela A.9 apresenta os valores mínimos para o coeficiente de correlação  $r$  de Pearson (em função do tamanho da amostra  $n$ ) ser significativo, ou seja, haver correlação entre as variáveis.

Tabela A.9 – Valor absoluto mínimo para o coeficiente de correlação de Pearson  $r$  ser significativo.

$n$	<i>Nível de significância <math>\alpha</math> em um teste bilateral</i>			
	<i>0,200</i>	<i>0,100</i>	<i>0,050</i>	<i>0,010</i>
5	0,687	0,805	0,878	0,959
6	0,608	0,729	0,811	0,917
7	0,551	0,669	0,754	0,875
8	0,507	0,621	0,707	0,834
9	0,472	0,582	0,666	0,798
10	0,443	0,549	0,632	0,765
11	0,419	0,521	0,602	0,735
12	0,308	0,497	0,576	0,708
13	0,380	0,476	0,553	0,684
14	0,365	0,458	0,532	0,661
15	0,351	0,441	0,514	0,641
16	0,338	0,426	0,497	0,623
17	0,327	0,412	0,482	0,606
18	0,317	0,400	0,468	0,590
19	0,308	0,389	0,456	0,575
20	0,299	0,378	0,444	0,561

Fonte: Barbetta *et al.*, 2004.