

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**JANAINA DE MELO FRANCO**

**PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO**  
**(BCP) UTILIZANDO RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA**

**MARINGÁ**

**2011**

**JANAINA DE MELO FRANCO**

**PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO  
(BCP) UTILIZANDO RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Estadual de Maringá como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

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

**MARINGÁ**

**2011**

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

F825p Franco, Janaina de Melo  
Produção de blocos de concreto para pavimentação  
(BCP) utilizando resíduos de galvanoplastia /  
Janaina de Melo Franco. -- Maringá, 2011.  
150 f. : figs., tabs.

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

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de  
Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Urbana, 2011.

1. Poeira de jateamento - Concreto. 2. Lodo de  
galvanoplastia - Concreto. 3. Blocos de Concreto  
para Pavimentação (BCP). 4. Resíduos de  
galvanoplastia - Concreto. I. Tavares, Célia Regina  
Granhen, orient. II. Universidade Estadual de  
Maringá. Departamento de Engenharia Civil. Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. III. Título.

CDD 22.ed. 671.732

JANAINA DE MELO FRANCO

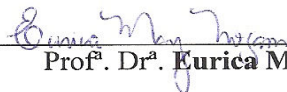
PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO (BCP) UTILIZANDO RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, na área de concentração Infra-estrutura e Sistemas Urbanos, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 11 de março de 2011.



Prof. Dr. Fernando Fernandes



Prof. Dr. Eurica Mary Nogami



Prof. Dr. Célia Regina Granhen Tavares

Orientadora

“Bem-aventurados os humildes de espírito, porque deles é o reino dos céus.  
Bem-aventurados os que choram, porque eles serão consolados.  
Bem-aventurados os mansos, porque eles herdarão a terra.  
Bem-aventurados os que têm fome e sede de justiça porque eles serão fartos.  
Bem-aventurados os misericordiosos, porque eles alcançarão misericórdia.  
Bem-aventurados os limpos de coração, porque eles verão a Deus.  
Bem-aventurados os pacificadores, porque eles serão chamados filhos de Deus.”  
Mateus 5, 3-9

Dedico este trabalho aos meus pais, Fátima (em memória) e Jair, e ao meu irmão, Cassiano, que são reflexos do amor de Deus em minha vida.

## AGRADECIMENTOS

*‘Deus derramou sobre nós essa graça, abrindo-nos para toda sabedoria e inteligência’*

*Efésios 1, 8.*

*Dedico este trabalho a todos aqueles que merecidamente fizeram e fazem parte desta  
minha caminhada.*

*À Deus, acima de tudo, por me agradecer com o dom da vida. Muito Obrigada Senhor!*

*À minha família, pelos cuidados e orações nesta jornada;*

*A minha mãe, Fátima Aparecida de Melo Franco (em memória), por ter sido um anjo na  
minha vida e por me ensinar que a ‘‘Vida é um grão de areia no oceano do amor de  
Deus’’, partindo dessa vida lutando até o fim.*

*Ao meu pai, Jair Cangussu Franco, por se mostrar um grande herói após a despedida de  
minha mãe;*

*Ao meu irmão Cassiano de Melo Franco e minha cunhada Alessandra Helena Dias, por  
terem me proporcionarem a graça de ser titia de anjo chamado Ana Clara;*

*À grande responsável por esta etapa da minha vida, minha orientadora, Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Célia  
Regina Granhen Tavares, pela amizade e dedicação, a quem guardo admiração e respeito.  
Muito Obrigada por tudo!*

*Ao Oswaldo Teruo Kaminata, pelo apoio no desenvolvimento experimental, amizade e  
convivência;*

*Ao professores Antônio Medina Neto, Eduardo Radovanovic e ao laboratorista Valmir  
Calsavara, pelo auxílio na interpretação dos resultados da difração de raios-X e da  
microscopia eletrônica de varredura;*

*Ao professor José Marcos Sasaki da Universidade Federal do Ceará, pela disposição em  
realizar as análises de fluorescência de raios-X;*

*Aos professores Carlos Humberto Martins, Romel Dias Vanderlei, Antônio Belincanta e demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, que sem exceção contribuíram sobremaneira para o desenvolvimento deste trabalho;*

*Aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção e Mecânica dos Solos e da Fábrica de Artefatos da UEM, pelo apoio no desenvolvimento do programa experimental;*

*Aos secretários Juarez Antônio dos Santos e Douglas Bueno Fernandes do Departamento de Engenharia Civil, pelo auxílio e amizade,*

*A Universidade Estadual de Maringá - UEM, por disponibilizar a infra-estrutura para a obtenção do título de mestre em Engenharia Urbana;*

*As indústrias Hergus Inox e KL do Brasil pela doação dos materiais utilizados;*

*A CAPES, pelo apoio financeiro durante a pesquisa.*

***‘Amigo fiel é proteção poderosa, e quem o encontrar, terá encontrado um tesouro’***

***Eclesiástico 6, 14***

*Ao meu amigo Hugo Renan Bolzani, meu anjo sem asas, sempre sorrindo ao meu lado;*

*Aos amigos, Fabiana Bassani, José Tomadon Júnior, Marcos Rossi Ramos, Daysa Amadei e Bruna da Graça Martins, irmãos, companheiros e conselheiros, por me ouvirem e me abraçarem quando era necessário;*

*Aos amigos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Campo Mourão, que mesmo na distância estiveram sempre por perto.*

*Aos amigos de Atibaia-SP, que me ensinam a cada dia que a amizade não se explica, simplesmente acontece e se fortalece com o tempo;*

*Aos amigos ‘Luquinhas’ do Ministério Universidades Renovadas e Grupo de Partilha de Profissionais, por me ensinarem sobre o ‘Sonho de Amor Para o Mundo!’*

*Ao grupo de Oração Templo dos Arcanjos, pelas palavras de ânimo, encorajamento e muitas orações;*

*Ao Projeto Mais Vida, pelas partilhas e me ensinarem a Apostar na Vida;*

*Ao Padre Rodrigo e Padre Paulo, pela convivência, amizade e aconselhamento espiritual;*



## RESUMO

A incorporação de resíduos industriais em matriz cimentícia vem recebendo grande destaque, principalmente quanto à estabilização de metais pesados que ocorre no processo de solidificação ou interação agregado/cimento. Para esse propósito, o presente trabalho teve como objetivo avaliar essa interação por meio da utilização dos resíduos de galvanoplastia (poeira de jateamento e lodo) na produção de blocos de concreto para pavimentação (BCP) analisando os efeitos físicos, químicos, mecânicos e microestruturais resultantes da substituição do cimento por estes resíduos (5, 10, 15, 20 e 25%) e comparando-os com os blocos sem substituição ou blocos referência. Os resultados dos pavimentos produzidos com a poeira de jateamento (BCP-PJ) apresentaram redução na absorção de água em todas as proporções em relação aos blocos referência para todas as idades, além de aumento na resistência à compressão nos BCP-PJ5 em todas as idades com relação aos blocos referência. Porém, os resultados de lixiviação e solubilização mostraram que em todas as proporções e nos blocos referência, os valores de arsênio se encontraram acima do limite da NBR 10004/2004, o que pode ser relacionado à quantidade desse metal encontrado nas análises realizadas com o cimento. Os resultados dos blocos utilizando o lodo (BCP-LG), na resistência à compressão apenas o BCP-LG5 apresentou valor superior a NBR 9781/1987 e inferior aos blocos referência aos 28 dias, além da redução na absorção de água com relação a todos os outros blocos. Nos ensaios de lixiviação e solubilização das amostras dos BCP com o lodo, as concentrações de arsênio foram reduzidas substancialmente em função das idades de cura, quando comparadas aos resultados encontrados para os BCP-PJ e os blocos referência. Ou seja, revelando a promissora aplicabilidade e viabilidade técnica da utilização dos resíduos de galvanoplastia no setor da construção civil.

**Palavras-chave:** poeira de jateamento, lodo de galvanoplastia, blocos de concreto para pavimentação.

## ABSTRACT

The incorporation of industrial wastes in cement matrix has received great emphasis, especially regarding the stabilization of heavy metal that occurs in the solidification process or interaction aggregate/cement. For this purpose, this study was to evaluate this interaction through the use of electroplating waste (dust from blasting and sludge) in the production of concrete block paving (CBP) analyzing the physical, chemical, mechanical and microstructural resulting the replacement of cement by these residues (5, 10, 15, 20 and 25%) and comparing them with the blocks or blocks without replacement reference. The results of the decks produced with dust from blasting (CBP-PJ) showed a reduction in the absorption of water in all proportions in relation to the blocks used for all ages, including the increase of compressive strength in CBP-PJ5 at all ages with respect to reference blocks. However, the results of leaching and solubilization showed that all ratios and reference blocks, the values of arsenic were found above the limit of NBR 10004/2004, which may be related to the amount of metal found in the analysis performed with cement. The results of using mud blocks (CBP-LG), the compressive strength only CBP-LG5 value above and below the NBR 9781/1987 blocks reference to 28 days, besides the reduction in water absorption with respect to all the other blocks. In solution and leaching tests of samples from the CBP with the sludge, the concentrations of arsenic were reduced substantially depending on the age of healing, when compared with results for CBP-PJ and reference blocks. That is, revealing the promising applicability and technical feasibility of using waste from electroplating in the construction industry.

**Keywords:** dust from blasting, electroplating sludge, concrete block paving.

## SUMÁRIO

|   |                  |
|---|------------------|
| <b>RESUMO.....</b>  | <b>VII</b>       |
| <b>ABSTRACT .....</b>   | <b>IX</b>        |
| <b>SUMÁRIO.....</b>   | <b>X</b>         |
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>  | <b>XIII</b>      |
| <b>LISTA DE TABELAS.....</b>  | <b>XVI</b>       |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>                                     | <b>XVIII</b>     |
| <br>  |                  |
| <b><u>1</u>    <u>INTRODUÇÃO.....</u></b>                                       | <b><u>18</u></b> |
| <b>1.1    JUSTIFICATIVA .....</b>   | <b>19</b>        |
| <b>1.2    OBJETIVOS DO TRABALHO .....</b>                                       | <b>20</b>        |
| 1.2.1    OBJETIVO GERAL .....   | 20               |
| 1.2.2    OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....  | 20               |
| <b>1.3    ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....</b>                                     | <b>21</b>        |
| <br>  |                  |
| <b><u>2</u>    <u>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</u></b>                            | <b><u>22</u></b> |
| <b>2.1    RESÍDUOS SÓLIDOS .....</b>  | <b>22</b>        |
| 2.1.1    DEFINIÇÃO .....  | 22               |
| 2.1.2    CLASSIFICAÇÃO .....  | 22               |
| <b>2.2    GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS NO ESTADO DO PARANÁ .....</b> | <b>23</b>        |
| <b>2.3    SETOR METALÚRGICO - ATIVIDADE GALVANOTÉCNICA.....</b>                 | <b>25</b>        |
| 2.3.1    DEFINIÇÃO .....  | 25               |
| 2.3.2    PROCESSO GALVANOTÉCNICO.....   | 26               |
| <b>2.4    ECOLOGIA INDUSTRIAL .....</b>   | <b>29</b>        |
| <b>2.5    SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....</b>              | <b>30</b>        |
| 2.5.1    DEFINIÇÃO .....  | 30               |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 2.5.2      | TÉCNICAS DESENVOLVIDAS .....   | 31        |
| <b>2.6</b> | <b>BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO (BCP).....</b>   | <b>34</b> |
| 2.6.1      | CARACTERÍSTICAS A SEREM AVALIADAS NA PRODUÇÃO DE BCP.....                                      | 38        |
| <b>3</b>   | <b><u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</u></b>   | <b>44</b> |
| 3.1        | APLICAÇÃO DE RESÍDUOS EM BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO ..                               | 46        |
| <b>4</b>   | <b><u>METODOLOGIA .....</u></b>  | <b>49</b> |
| 4.1        | COLETA DA MICROESFERA DE VIDRO E DOS RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA                                | 50        |
| 4.2        | CARACTERIZAÇÃO DA MICROESFERA DE VIDRO E DOS RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA.....                   | 50        |
| 4.2.1      | CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....  | 51        |
| 4.2.2      | CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA – PROCESSO DE ABERTURA DA AMOSTRA .....                                 | 51        |
| 4.2.3      | CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL .....   | 54        |
| 4.3        | DELINEAMENTO EXPERIMENTAL PARA FABRICAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO (BCP) ..... | 55        |
| 4.3.1      | TRAÇO DOS CORPOS DE PROVA .....  | 55        |
| 4.3.2      | PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....   | 57        |
| 4.3.3      | CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS BCP COM OS RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA                                | 58        |
| 4.3.4      | CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS BCP COM OS RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA .....                        | 58        |
| 4.3.5      | CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS BCP COM OS RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA .....                         | 60        |
| 4.3.6      | CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS BCP COM RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA .....                    | 60        |
| <b>5</b>   | <b><u>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</u></b>  | <b>61</b> |
| 5.1        | CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS NATURAIS E AGREGADOS ARTIFICIAIS.....                      | 61        |
| 5.1.1      | GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS NATURAIS .....   | 61        |
| 5.1.2      | GRANULOMETRIA DOS RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA .....   | 63        |

|                 |  |                   |
|-----------------|--|-------------------|
| <b>5.2</b>      | <b>CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA .....</b>                             | <b>65</b>         |
| 5.2.1           | DETERMINAÇÃO DE METAIS POR MEIO DE DIGESTÃO NITRICO-PERCLÓRICA..                               | 65                |
| 5.2.2           | LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO.....  | 66                |
| 5.2.3           | ATIVIDADE POZOLÂNICA.....  | 69                |
| <b>5.3</b>      | <b>PROPRIEDADES MICROESTRUTURAIS DA DOS RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA .</b><br><b>.....</b>       | <b>70</b>         |
| 5.3.1           | FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX) .....   | 70                |
| 5.3.2           | DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) E MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA<br>(MEV) .....                 | 71                |
| <b>5.4</b>      | <b>DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA</b><br><b>PAVIMENTAÇÃO (BCP).....</b> | <b>74</b>         |
| 5.4.1           | CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....  | 75                |
| 5.4.2           | CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA .....  | 78                |
| 5.4.3           | CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA .....   | 84                |
| 5.4.4           | CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL .....   | 92                |
| <b><u>6</u></b> | <b><u>CONCLUSÕES.....</u></b>  | <b><u>102</u></b> |
| <b><u>7</u></b> | <b><u>SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....</u></b>   | <b><u>104</u></b> |
| <b><u>8</u></b> | <b><u>REFERÊNCIAS.....</u></b>   | <b><u>105</u></b> |
|                 | <b>APÊNDICES .....</b>   | <b>113</b>        |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 - Resíduos sólidos industriais gerados no estado do Paraná (ton./ano).....  | 24 |
| Figura 2.2 - Geração de resíduos sólidos industriais no setor metalúrgico (ton./ano) .....   | 24 |
| Figura 2.3 - Classificação dos resíduos sólidos do setor metalúrgico (ton./ano) .....  | 25 |
| Figura 2.4 - Composição química do cimento Portland e outros materiais cimentícios .....   | 33 |
| Figura 2.5 - BCP ou Paver do tipo Holland.....   | 35 |
| Figura 2.6 - Rodovia construída com BCP na Colômbia .....  | 36 |
| Figura 2.7 - Arranjo de assentamento: a) espinha-de-peixe ou ângulo reto; b) fileira e c) trama.....                                     | 37 |
| Figura 2.8 - Comparativo de classes texturais, materiais naturais e artificiais segundo normas e instituições, com dimensões em mm ..... | 38 |
| Figura 2.9 - Difratoograma da poeira de jateamento.....  | 42 |
| Figura 2.10 - Morfologias típicas da etringita e potlandita .....  | 43 |
| Figura 2.11 - Morfologia típica do C-S-H amorfo .....  | 43 |
| Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa .....   | 49 |
| Figura 4.2 - a) Microesfera de vidro, b) poeira de jateamento e c) lodo de galvanoplastia  | 50 |
| Figura 4.3 - a) agitador magnético e b) phgâmetro .....  | 53 |
| Figura 4.4 - Evolução da resistência à compressão do cimento CPV-ARI.....  | 56 |
| Figura 4.5 - a) Vibro-prensa e b) corpos de prova produzidos.....  | 57 |
| Figura 4.6 - a) processo de capeamento, b) bloco capeado e c) Prensa hidráulica.....   | 59 |
| Figura 5.1 - Curva granulométrica do agregado miúdo (areia).....   | 62 |
| Figura 5.2 - Curva granulométrica da brita “0” ou pedrisco .....   | 62 |
| Figura 5.3 - Curva granulométrica dos resíduos de galvanoplastia.....  | 65 |
| Figura 5.4 - a) Micrografia (aumento 200x) e b) difratograma da poeira de jateamento ....  | 72 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.5 - a) Micrografia (aumento 3000x) e b) difratograma do lodo de galvanoplastia .....                                  | 73 |
| Figura 5.6 - a) Micrografia (aumento 3.000x) e b) difratograma do cimento – CPV .....  | 74 |
| Figura 5.7 - Efeito da taxa de absorção de água nos BCP-PJ e REF ao longo do tempo....   | 76 |
| Figura 5.8 - Efeito da taxa de absorção de água nos BCP-LG e REF ao longo do tempo ..  | 77 |
| Figura 5.9 - Média de resistência à compressão dos BCP-PJ em todas as idades e substituições .....                             | 79 |
| Figura 5.10 - Evolução da resistência à compressão de BCP-PJ ao longo do tempo.....  | 80 |
| Figura 5.11 - Média de resistência à compressão dos BCP-LG em todas as idades e substituições .....                            | 82 |
| Figura 5.12 - Evolução da resistência à compressão de BCP-LG ao longo do tempo .....   | 83 |
| Figura 5.13 - Aspecto da interação BCP-LG25.....   | 84 |
| Figura 5.14 - Evolução da concentração de metais (As e Se) do lixiviado nos BCP-REF e BCP-PJ ao longo das idades de Cura ..... | 88 |
| Figura 5.15 - Evolução da concentração de metais (As e Se) do lixiviado nos BCP-REF e BCP-LG ao longo das idades de Cura ..... | 89 |
| Figura 5.16 - Variação do pH em função das idades de cura para os BCP-PJ.....  | 90 |
| Figura 5.17 - Variação do pH em função dos idades de cura para os BCP-LG .....   | 91 |
| Figura 5.18 - a) Micrografia (aumento de 1000x) e b) difratograma do BCP-REF, 28 dias .....                                    | 93 |
| Figura 5.19 - a) Micrografia (aumento de 1000x) e b) difratograma do BCP-PJ5, 28 dias  | 94 |
| Figura 5.20 - a) Micrografia (aumento de 1000x) e b) difratograma do BCP-PJ10, 28 dias .....                                   | 94 |
| Figura 5.21 - a) Micrografia (aumento de 1000x) e b) difratograma do BCP-PJ15, 28 dias .....                                   | 95 |
| Figura 5.22 - a) Micrografia (aumento de 5000x) e b) difratograma do BCP-PJ20, 28 dias .....                                   | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.23 - a) Micrografia (aumento de 2000x) e b) difratograma do BCP-PJ25, 28 dias<br>..... | 96  |
| Figura 5.24 - a) Micrografia (aumento de 6000x) e b) difratograma do BCP-REF, 28 dias<br>.....  | 97  |
| Figura 5.25- a) Micrografia (aumento de 1000x) e b) difratograma do BCP-LG5, 28 dias            | 98  |
| Figura 5.26 – a) Micrografia (aumento de 1500x) e b) difratograma do BCP-LG10, 28 dias<br>..... | 99  |
| Figura 5.27 - a) Micrografia (aumento de 2000x) e b) difratograma do BCP-LG15, 28 dias<br>..... | 100 |
| Figura 5.28 - a) Micrografia (aumento de 2000x) e b) difratograma do BCP-LG20, 28 dias<br>..... | 100 |
| Figura 5.29 - a) Micrografia (aumento de 2000x) e b) difratograma do BCP-LG25, 28 dias<br>..... | 101 |



## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1 - Exigências Químicas dos Materiais Pozolânicos .....   | 32 |
| Tabela 2.2 - Exigências Físicas para os Materiais Pozolânicos .....  | 33 |
| Tabela 2.3 - Análise de Fluorescência de raios-X em estudos com resíduos .....   | 41 |
| Tabela 4.1 - Parâmetros técnicos para leitura em EAA e cromatógrafo de íons .....  | 52 |
| Tabela 4.2 - Composição dos traços dos BCP .....   | 55 |
| Tabela 4.3 - Características do aglomerante (CPV-ARI) .....  | 56 |
| Tabela 4.4: Fator multiplicativo da resistência obtida no ensaio de resistência à compressão de blocos para pavimentação ..... | 59 |
| Tabela 5.1 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo .....  | 61 |
| Tabela 5.2 - Massa Específica e Unitária dos agregados naturais .....  | 63 |
| Tabela 5.3- Composição granulométrica dos resíduos de galvanoplastia .....   | 64 |
| Tabela 5.4 - Concentração média e desvio-padrão dos ânions extraídos em digestão ácida .....                                   | 66 |
| Tabela 5.5- Concentração de ânions no extrato lixiviado dos resíduos de galvanoplastia e cimento Portland .....                | 67 |
| Tabela 5.6 - Concentração de ânions no extrato solubilizado dos resíduos de galvanoplastia e cimento .....                     | 68 |
| Tabela 5.7 - Medida quantitativa da Atividade Pozolânica (Método Chapelle Modificado) .....                                    | 69 |
| Tabela 5.8 - Concentração (%) dos elementos avaliados por fluorescência de raios-X .....                                       | 71 |
| Tabela 5.9 - Média (%) dos resultados da absorção dos BCP-PJ após imersão em água ...  | 75 |
| Tabela 5.10 - Média (%) dos resultados da absorção dos BCP-LG após imersão em água   | 77 |
| Tabela 5.11 - Médias de resistência à compressão dos BCP-PJ .....  | 79 |
| Tabela 5.12 - Médias de resistência à compressão dos BCP-LG .....  | 82 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 5.13 - Ânions presentes no extrato lixiviado dos BCP-PJ (28 dias).....      | 84 |
| Tabela 5.14 - Ânions presentes no extrato solubilizado dos BCP-PJ (28 dias).....   | 85 |
| Tabela 5.15 - Ânions presentes no extrato lixiviado dos BCP-LG (28 dias) .....     | 86 |
| Tabela 5.16 - Ânions presentes no extrato solubilizado dos BCP - LG (28 dias)..... | 87 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**AA** – Absorção de Água

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas

**BCP** – Blocos de Concreto para Pavimentação

**CAM** – Central de Análises Avançadas de Materiais

**CMI** – Central de Microscopia

**COMCAP** - Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa

**CP** – Corpo de Prova

**CPV-ARI** – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

**C-S-H** – Silicato de Cálcio Hidratado

**CV** - Coeficiente de Variância

**DESVPAD** – Desvio Padrão

**DRX** – Difração de Raios-X

**FUNASA** - Fundação Nacional de Saúde

**FRX** – Fluorescência de Raios-X

**ICPI** - Interlocking Concrete Pavement Institute

**IERSI** – Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Industriais do Estado do Paraná

**LG** – Lodo de Galvanoplastia

**MEV** – Microscopia Eletrônica de Varredura

**NBR** – Norma Brasileira Registrada

**pH** – Potencial Hidrogeniônico

**PJ** – Poeira de Jateamento

**REF** – Referência

**SESI** - Serviço Social da Indústria

**UEM** – Universidade Estadual de Maringá

**UFC** – Universidade Federal do Ceará

# 1 INTRODUÇÃO

---

A conservação do ambiente representa para as indústrias uma responsabilidade indiscutível, sendo assim, cada vez mais a competitividade do mercado tem exigido atuações proativas e concretas na preservação ambiental, que se reflete nas atividades que apresentem o mínimo de impacto ambiental por meio de tecnologias limpas, com práticas de minimização na geração de resíduos e maximização de reaproveitamento, permitindo agregar valor aos rejeitos, economia de energia e outros ganhos.

Tendo em vista que todo processo industrial gera uma quantidade considerável de resíduos sólidos, observa-se a necessidade de implantação de tecnologias inovadoras, sobretudo aquelas que promovam o retorno desses resíduos ao processo produtivo, ou mesmo que levem a produção de novos produtos com caráter ecológico, favorecendo a diminuição do depósito de resíduos sólidos em aterros.

No Brasil, apesar do gerenciamento adequado ser composto de grandes desafios, a reutilização 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, quanto para a disposição, tem-se que levar em consideração os elementos potencialmente contaminantes, que podem ser introduzidos no meio circundante (PEREIRA *et al.*, 2008).

A grande expansão metal-mecânica implica no aumento da produção de subprodutos e rejeitos, com complexidade em suas características químicas e periculosidade, levando-se a considerar esse setor como um setor ambientalmente importante e impactante, em função do seu alto potencial poluidor.

Diante dessa problemática, uma oportunidade para melhorar a sustentabilidade na atividade galvanotécnica é a busca científica por alternativas inovadoras, para utilização de seus resíduos sólidos, considerados sem utilização, como matéria-prima na confecção de novos produtos para a construção civil.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A Engenharia Urbana pode ser identificada como uma área multidisciplinar que reúne segmentos da engenharia e áreas afins, sendo uma delas o saneamento, que tem por objetivo alcançar a salubridade ambiental, para proteger e melhorar as condições de vida da população (FUNASA, 2004).

Tem-se notado que os resíduos sólidos industriais são um dos maiores responsáveis pelas agressões ao ambiente, devido às quantidades de produtos químicos como cianuretos, solventes e metais (mercúrio, cádmio, chumbo etc.) utilizados na criação e/ou melhoria de produtos, ameaçando os recursos naturais onde são dispostos (KRAEMER, 2005).

O grande volume dos resíduos sólidos industriais gerados pelo setor metalúrgico, e o alto custo de manejo, estimulam pesquisas na busca de soluções adequadas para o seu gerenciamento, destacando neste contexto, o aproveitamento desses resíduos na construção civil, por meio da técnica de solidificação/estabilização, que consiste em encapsular resíduos perigosos dentro de uma matriz sólida de grande integridade estrutural, além de estabilizar os resíduos perigosos e transformá-los em materiais menos poluentes.

Dessa forma, a utilização de resíduos considerados perigosos por meio da solidificação/estabilização tem ganhado grande atenção, tendo em vista os benefícios ambientais pela diminuição destes em aterros industriais, revertendo-os em matéria-prima na área da construção civil, por meio da aplicação em matriz cimentícia, proporcionando ganhos mecânicos da resistência a compressão e outros, por meio do encapsulamento de metais pesados.

## **1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Estudar a incorporação de resíduos sólidos industriais do setor galvanotécnico, notadamente os provenientes da câmara de jateamento (Poeira de Jateamento) e os provenientes da Estação de Tratamento de Efluentes (Lodo de Galvanoplastia), na produção de blocos de concreto para pavimentação por meio da técnica de solidificação/estabilização.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos desta pesquisa podem ser resumidos nos itens a seguir:

- Analisar as características químicas dos resíduos de galvanoplastia por meio da digestão nítrico-perclórica, ensaios de lixiviação e solubilização dos resíduos segundo as normas técnicas brasileiras, bem como a atividade pozolânica por meio do método Chapelle Modificado;
- Analisar a microestrutura dos resíduos por meio da Fluorescência de Raios-X (FRX), Difração de Raios-X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- Avaliar a influência dos resíduos em matriz cimentícia em substituição ao cimento nas proporções 5, 10, 15, 20 e 25%, bem como corpos de prova sem substituição ou referência, por meio de análises químicas, com ensaios de lixiviação e solubilização, análises microestruturais, por meio da DRX e MEV, além de análises físicas e mecânicas como absorção de água e resistência a compressão nos 7, 14, 28, 60 e 90 dias.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Este trabalho é composto por 8 capítulos. No Capítulo 2 apresenta-se um panorama geral sobre os resíduos sólidos, sua geração na atividade industrial no estado do Paraná, colocando em evidência a geração resíduos da atividade galvanotécnica (poeira de jateamento e lodo de galvanoplastia), presentes no setor metalúrgico. Assim como o desenvolvimento da ecologia industrial, com a missão do gerenciamento de resíduos industriais com a técnica de solidificação/estabilização em matriz cimentícia, que visa a redução de impactos ambientais causados por resíduos sólidos com grandes quantidades de metais pesados e um exemplo de possível incorporação desse material, na área de pré-moldados, mais precisamente em blocos de concreto para pavimentação (BCP).

No Capítulo 3 são apresentados trabalhos desenvolvidos por outros pesquisadores no que se refere à técnica de solidificação/estabilização, assim como a aplicação de resíduos sólidos em BCP, além de diversos parâmetros que devem ser analisados na incorporação deste material em matriz cimentícia.

No Capítulo 4 são caracterizados todos os materiais que foram empregados no desenvolvimento experimental da pesquisa. Determinando algumas das propriedades físicas, químicas e microestruturais dos agregados miúdos e graúdos e, para a matriz propriamente dita, além das características já citadas, são apresentadas suas características mecânicas.

No Capítulo 5 são apresentados os desenvolvimentos experimentais da primeira e segunda fase. Os resultados advindos dos ensaios e, finalmente, as análises estabelecidas comparativamente com os dados obtidos em outras pesquisas.

No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões gerais dos blocos de concreto para pavimentação com a utilização da poeira de jateamento e lodo de galvanoplastia.

No Capítulo 7 são sugeridas algumas modificações na pesquisa para o prosseguimento do estudo envolvendo agregados reciclados de concreto.

No Capítulo 8 encontra-se a bibliografia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

---

### 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

#### 2.1.1 Definição

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

Todo resíduo nos estados sólido e semi-sólido 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 industriais são os materiais em estado sólido ou semi-sólido que resultam da atividade industrial, apresentando características e composição muito variadas por serem originários nas mais diferentes atividades, podendo ser inerte ou altamente tóxico, e ainda ser composto por cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plástico, papel, madeira, fibras, borracha, metal, escórias, vidros, cerâmicas etc.

#### 2.1.2 Classificação

A classificação segundo a NBR 10004/2004 envolve a identificação do processo ou atividade que deu origem aos resíduos, seus constituintes, características e a comparação desses constituintes com listagens (anexos) e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente são conhecidos.

De acordo com essa Norma os resíduos são classificados em:

a) *Resíduos Classe I – Perigosos*: Aqueles que apresentam riscos a saúde pública e ao meio ambiente ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade ou ainda constem nos anexos A ou B da NBR 10004/2004.



b) *Resíduos Classe II – Não perigosos*: Os códigos para alguns resíduos dessa classe encontram-se no anexo H da NBR 10004/2004.

- *Resíduos Classe II A – Não inertes*: Aqueles que podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água e que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes.

- *Resíduos Classe II B – Inertes*: Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a NBR 10007/2004, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água desionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006/2004, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G da NBR 10004/2004.

Para uma correta aplicação da NBR 10004/2004, é necessário conhecer as seguintes normas complementares:

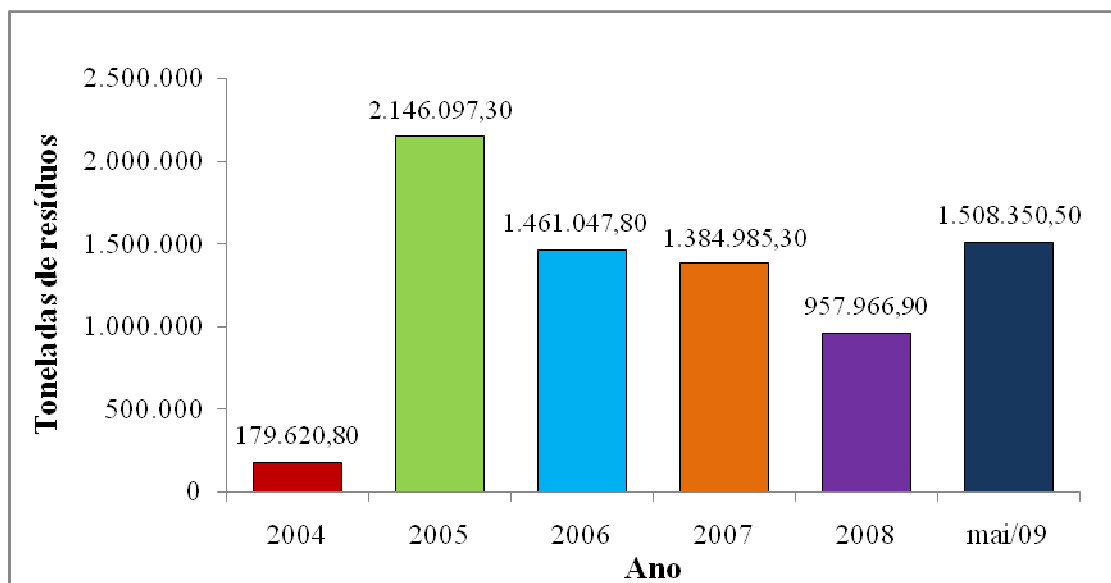
NBR 10005/2004 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos: fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos visando diferenciar os resíduos classificados pela NBR 10004/2004 como *classe I - perigosos* e *classe II - não perigosos*.

NBR 10006/2004 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos: fixa os requisitos exigíveis para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados na NBR 10004/2004 como *classe II A - não inertes* e *classe II B – inertes*, não se aplicando a resíduos no estado líquido.

NBR 10007/2004 - Amostragem de resíduos sólidos: fixa os requisitos exigíveis para amostragem de resíduos sólidos, ou seja, o conjunto de operações que conduzem à obtenção de uma pequena porção realmente representativa da composição média do todo.

## **2.2 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS NO ESTADO DO PARANÁ**

De acordo com o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Industriais do Estado do Paraná – IERSI/PR, realizado pelo Instituto Ambiental do Paraná - IAP, entre janeiro de 2004 a maio de 2009 em 32 municípios, foram geradas quantidades de resíduos sólidos industriais conforme a Figura 2.1.

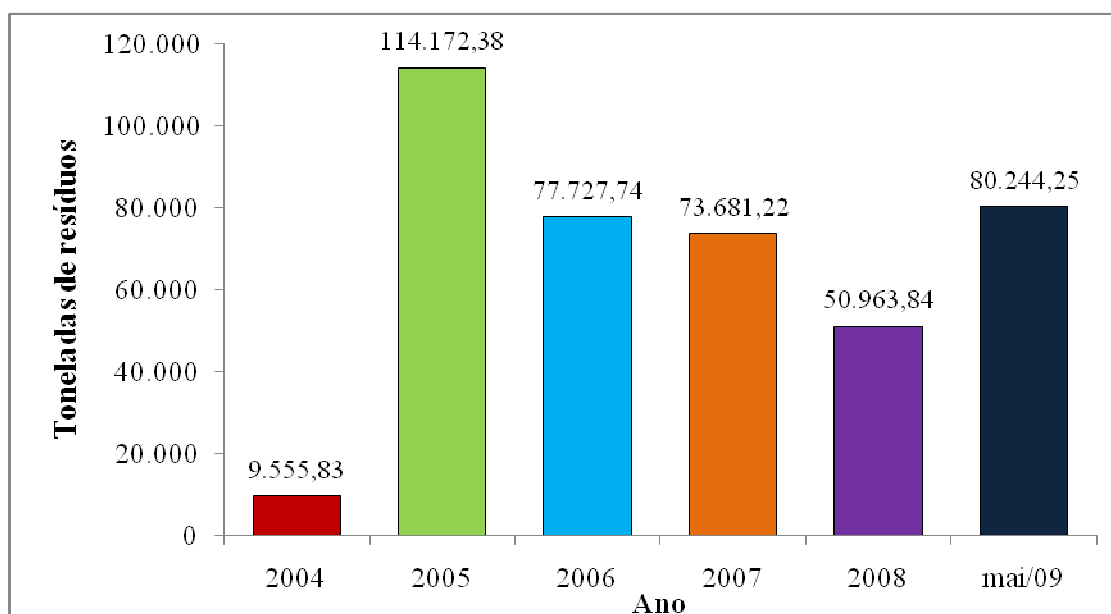


**Figura 2.1 – Geração de resíduos sólidos industriais para o estado do Paraná (ton./ano)**

**Fonte: Adaptado, IERSI – PR (2009).**

Devido ao processo de implantação no ano de 2004, os resultados não foram todos reunidos para o inventário. De 2004 em diante a campanha para o preenchimento dos formulários foi mais intensa tendo em vista que entre 2008 e 2009 foi efetivamente a maior quantia de formulários preenchidos, por isso os valores passam a ser mais confiáveis.

De acordo com as tipologias na esfera industrial, o setor da metalurgia básica corresponde a 5,32% do total do inventário e sua geração de resíduos sólidos (ton./ano) e apresentada na Figura 2.2.



**Figura 2.2 - Geração de resíduos sólidos industriais no setor metalúrgico (ton./ano)**

**Fonte: Adaptado, IERSI – PR (2009).**

Dessa quantidade de resíduos sólidos industriais, gerados anualmente pelo setor metalúrgico, 1,82% é classificado como resíduo sólido perigoso e 6,61% é classificado como resíduo sólido não-perigoso, conforme pode ser visto na Figura 2.3.

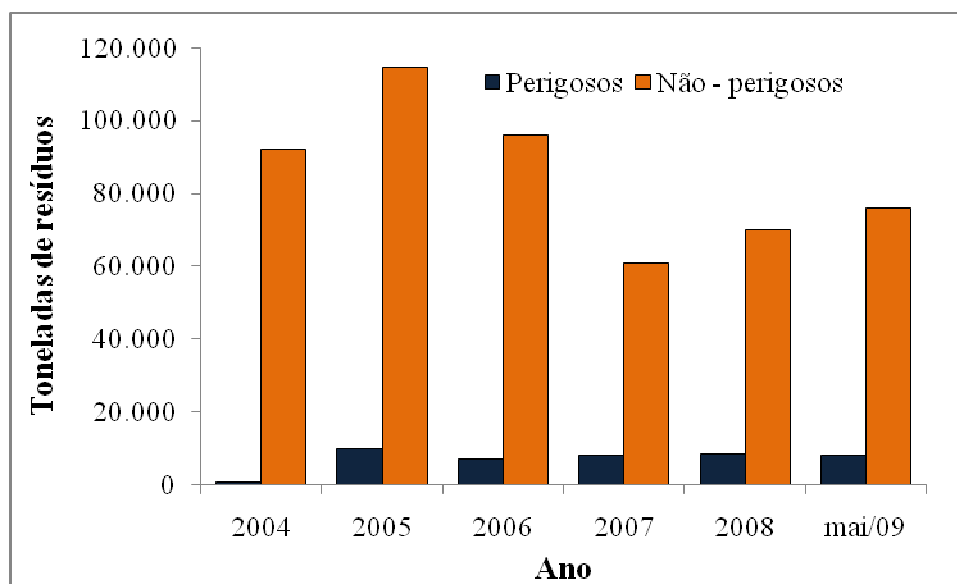


Figura 2.3 - Classificação dos resíduos sólidos do setor metalúrgico (ton./ano)

Fonte: Adaptado, IERSI – PR (2009).

A partir desses resultados, é possível verificar o grande potencial de utilização desses resíduos, como retorno ao mesmo processo produtivo ou como matéria-prima em outra atividade. Assim, diminuindo a simples disposição destes em aterros industriais em todo o estado do Paraná.

## 2.3 SETOR METALÚRGICO - ATIVIDADE GALVANOTÉCNICA

### 2.3.1 Definição

O termo galvanoplastia refere-se ao “processo de eletrodeposição de um metal sobre um molde, sendo que a deposição de uma fina camada de metal sobre outro metal é chamada de galvanostegia” (BORGGO, 2005).

A galvanoplastia é uma técnica, por via eletrolítica, de deposição de determinados íons metálicos na superfície dos corpos metálicos ou não, que visa, principalmente, proteger as peças contra corrosão e dar um acabamento superficial. As peças são submetidas a banhos químicos ou eletrolíticos, seguidos de lavagens com água para limpeza. Para cada tipo de acabamento existe uma seqüência de tratamento, que necessita de águas de lavagem,

produzindo efluentes líquidos com características diversas. Na galvanização com zinco-ácido, geralmente, as peças passam por um banho desengraxante, para remoção de óleos e graxas, seguido de um banho decapante, para remoção de óxidos, e uma série de outros banhos químicos que visam à limpeza da peça para receber a deposição metálica (BRESAOLA JUNIOR e CARRARA, 2000).

### 2.3.2 Processo Galvanotécnico

No processo de galvanoplastia existem três etapas principais: Pré-Tratamento – etapa na qual é produzida a poeira de jateamento (PJ); Tratamento - etapa por meio da qual é produzido o efluente e por consequência o lodo (LG) e Pós-Tratamento.

O pré-tratamento consiste na preparação da superfície a ser tratada, por meio mecânico e/ou químico, para que o revestimento tenha boa aderência, uniformidade e aparência.

- *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* – desengraxe e decapagem: desengraxe realizado com solventes clorados como tricloroetileno e percloroetileno; desengraxe alcalino feito com carbonato de sódio, hidróxido de sódio, fosfato, silicato, detergentes sintéticos, cianeto e complexantes tipo EDTA, glutamato e citrato de sódio; desengraxe eletroquímico, no qual a peça é polarizada, catodicamente, anodicamente ou alternadamente, num meio alcalino; decapagem, realizada numa solução ácida, geralmente ácido sulfúrico, clorídrico ou fluorídrico, para a remoção de camada de óxidos, hidróxidos ou outras impurezas sólidas.

Na etapa de tratamento, a peça é ligada ao pólo negativo de uma fonte de corrente contínua, tornando-se cátodo, no qual ocorre a deposição. O tratamento pode se desenvolver numa seqüência de banhos. Para a cromação, a peça é inicialmente cobreada, a seguir niquelada e, ao final, recebe uma camada de cromo. No caso do 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.

No pós-tratamento, as peças podem passar pelos 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).

Segundo Pontes (2000), os resíduos sólidos gerados no processo galvanotécnico são: sucata de metais ferrosos e não-ferrosos, cavacos, lodo do processo de tratamento de efluentes líquidos, resíduos de pré-tratamentos mecânicos, embalagens de produtos químicos, filtros de banhos e sacos de ânodos.

### **2.3.2.1 Poeira de Jateamento ou Poeira de Vidro**

Segundo o Decreto n.º 5.063 (2004), do Ministério do Trabalho e Emprego, tornou-se proibido o processo de trabalho de jateamento com areia, uma vez que esse processo gera uma elevada concentração de sílica cristalina (quartzo), responsável por uma alta incidência de quadros graves de silicose e comprovadamente cancerígena. Com isso, surgiram vários materiais substitutos à areia nas câmaras de jateamento, um deles, a microesfera de vidro.

Na etapa de pré-tratamento de superfícies metálicas, o setor de limpeza mecânica é o local onde se encontram as câmaras de jateamento, e onde são gerados os resíduos sólidos chamados de poeira de jateamento (PJ). Esse equipamento lança em alta velocidade as microesferas de vidro (MV), material utilizado comercialmente, contra as peças metálicas com o objetivo de retirar, por meio do efeito abrasivo, carepas e asperezas, assim como impurezas presentes na superfície da peça.

Após terem sido usadas no processo de limpeza mecânica, as microesferas de vidro se rompem, perdendo sua propriedade de remoção, sendo então descartadas. Essas esferas pós uso, segundo Borgo (2005), são classificadas comumente como resíduo sólido - classe IIB (Não-perigoso – Inerte).

O vidro em microesferas é obtido pela fusão de rochas e minerais, seguida por resfriamento rápido, que não permite a cristalização. Certos materiais são mais adequados para esse procedimento, por exemplo, a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), na forma de quartzo, proveniente de arenitos. Como o ponto de fusão do quartzo é muito elevado ( $1.713^\circ\text{C}$ ), adicionam-se certos ingredientes, como calcário ( $\text{CaCO}_3$ ), carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e bórax ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), para reduzir a temperatura de fusão. Apesar de não poluente, produzido por matérias-primas naturais que não agredem o ambiente, o vidro não é biodegradável, ou

seja, é um material que não se decompõe, diminuindo assim a vida útil de vários aterros sanitários, ocupando um espaço desnecessário (SKINNER, 1996; apud BORGIO, 2005).

### 2.3.2.2 *Lodo Galvânico*

Os processos galvânicos são tratamentos químicos superficiais que visam a decapagem e/ou processo de deposição eletroquímica em superfícies metálicas, ou de imersão das peças de metais em banhos eletroquímicos (cromação, niquelação, zincagem, anodização etc). Em geral a peça metálica, após o recobrimento superficial, é novamente submetida a processos de limpeza e lavagem, para interromper a reação eletroquímica ou ainda, eliminar excessos e uniformizar a quantidade de material depositado. Nesse caso, a água de lavagem irá conter parte dos constituintes utilizados para o recobrimento (Ex: Cu, Cr, Ni, Zn etc.). Associados a estes metais, também estão presentes nas águas de lavagem, os componentes utilizados para neutralizar a suspensão, ou seja, interromper o processo. Esses componentes são geralmente constituídos por íons de metais alcalinos e ânions tais como os nitratos, os sulfatos entre outros. Obrigatoriamente as águas de lavagem devem ser submetidas a tratamentos químicos, por meio de adição de cal, sais e hidróxidos, visando a deposição da fase sólida, também chamada lodo ou lama galvânica (SILVA, 2004).

Em sua composição estão presentes compostos químicos em diferentes formas: hidróxidos, óxidos hidratados e sais dos metais das linhas de tratamento superficial em questão. Podem estar presentes sais solúveis de metais pesados, além de carbonatos, sulfatos e fosfatos de cálcio. Quando a neutralização é realizada com carbonato de cálcio, pode conter ainda materiais inertes, principalmente  $\text{SiO}_2$ , proveniente de silicatos alcalinos dos banhos de limpeza, de contaminações do óxido hidratado de cálcio, utilizado para neutralização bem como de impureza em geral. Podendo ainda estar presentes complexos de metais com cianetos, quando, durante a oxidação de cianeto com compostos clorados, se formarem complexos metálicos insolúveis e não-oxidáveis, como, por exemplo, ferrocianeto de zinco (MILANEZ *et al.*, 2005).

A disposição final do lodo galvânico contendo metais pesados deve ser em aterros industriais controlados ou por meio do co-processamento em fornos de cimento (no Paraná esse procedimento não é liberado pelo órgão ambiental). No programa Desperdício Zero, coordenado pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMA, do

estado do Paraná, uma das metas para os resíduos industriais é desenvolver ações conjuntas com a Federação das Indústrias do Paraná – FIEP, no sentido de ampliar a reciclagem de resíduos, com o apoio da bolsa de reciclagem de resíduos e notificar empresas que possuam resíduos armazenados sem destino definido, atendendo a Resolução SEMA nº 31 (1998), que não permite armazenamento de resíduos por prazo superior a um ano (BORGIO, 2005).

## **2.4 ECOLOGIA INDUSTRIAL**

No setor industrial de forma geral a adoção de metodologias de prevenção de poluição vem sendo proposta como estratégia eficaz para evitar os desperdícios de matérias-primas e energia, convertidos em resíduos sólidos, líquidos e gasosos, responsáveis por adicionar custos aos processos produtivos e gerar problemas ambientais (KIPERSTOK *et al.*, 2002).

A Ecologia Industrial visa prevenir a poluição, reduzindo a demanda por matérias-primas, água e energia e a devolução de resíduos à natureza. Porém, enfatiza que por meio de sistemas integrados de processos ou indústrias, os resíduos ou subprodutos de um processo possam servir como matéria-prima de outro (MARINHO e KIPERSTOK, 2001).

Parte da consideração de que, por mais que se aperfeiçoem os processos de limpeza da produção, sempre poderá ocorrer a geração de algum resíduo ou subproduto, para os quais não haja uma alternativa economicamente viável. Alternativamente, a empresa poderá não ter interesse em desenvolver outro processo que o aproveite, dessa forma, a integração adequada de diferentes empresas deve ocorrer, de forma que os resíduos e subprodutos gerados por uma delas possam servir de matérias-primas para outras, reduzindo a disposição inadequada. Da mesma forma, a sua utilização como matéria-prima reduziria a demanda por novos recursos naturais (MARINHO e KIPERSTOK, 2001).

O sentido geral do programa Ecologia Industrial vem ao encontro com o que se propõe neste trabalho, ou seja, a utilização de dois resíduos industriais com composição diferentes, porém, do mesmo ramo (galvanoplastia) e sem nenhum outro tipo de alternativa de disposição a não ser o aterro industrial. Aumentando cada vez mais o potencial promissor de utilização em outros ramos industriais como, por exemplo, a indústria de pré-moldados do setor de construção civil.

## **2.5 SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

### **2.5.1 Definição**

A solidificação/estabilização (S/E) de resíduos sólidos é um processo também conhecido como encapsulamento (encapsulação) ou fixação. Trata-se de uma tecnologia que vem sendo utilizada como alternativa aos processos tradicionais de tratamento de resíduos e, principalmente, como um meio de facilitar o manuseio, o transporte e o armazenamento. Consiste, basicamente, em estabilizar, química e/ou fisicamente os resíduos sólidos, através de adição de aglomerantes ou da inserção em invólucros eficientes (PABLOS, 2008).

Solidificação se refere 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; USEPA, 2009).

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-se menos prejudiciais. (SHI e SPENCE, 2004; USEPA, 2009).

A seguir são apresentadas algumas vantagens e desvantagens dessa técnica (GIRALDELLI, 1990):

#### **Vantagens do processo de S/E:**

- Matéria-prima abundante e barata;
- Tecnologia de manuseio e mistura do agente ligante é conhecida e os equipamentos são comuns;
- Não é necessária a secagem do resíduo;
- Os sistemas são muito tolerantes a variações químicas e os resíduos só necessitam de pré-tratamento se contiverem componentes que retardem as reações com o agente ligante;
- As características de lixiviação do produto final, se necessário, podem ser melhoradas por meio de revestimentos selantes;



- Pode variar a quantidade de agente ligante usado para se produzir produtos com alta capacidade de suporte, bons materiais de fundação ou sub-base.

#### **Desvantagens do processo de S/E:**

- Os produtos finais não revestidos podem requerer um projeto de aterro específico;
- Os resíduos contendo grandes quantidades de impurezas que afetam o endurecimento e a cura da mistura resíduo-agente ligante podem necessitar de um pré-tratamento ou da utilização de agentes ligantes especiais de custo mais elevado, ou aditivo;
- Quando o agente ligante é o cimento, sua alcalinidade transforma o íon amônio em gás amônia.

Contudo, em geral, essa técnica é eficaz para resíduos inorgânicos, não sendo apropriado para o tratamento de resíduos com contaminação orgânica, devido as interações desfavoráveis que ocorrem entre os materiais orgânicos e a matriz de agente ligante. Quando o agente ligante é o cimento, os compostos orgânicos podem ter um efeito de retardamento sobre a reação de hidratação do cimento e afetar negativamente a microestrutura, influenciando a mecânica e a lixiviação dos materiais cimentícios (CIOFFI, 2001).

#### **2.5.2 Técnicas Desenvolvidas**

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

Como o objetivo do presente trabalho foi o estudo da S/E em matrizes de cimento Portland será o item comentado a seguir, além da técnica baseada em materiais pozolânicos que compreende aspectos necessários para o entendimento do trabalho.

### 2.5.2.1 *Técnica baseada em materiais pozolânicos*

As pozolanas são substâncias naturais ou artificiais, de composição silicosa ou sílico-aluminosa, que, não sendo por si sós cimentícias, reagem, porém, com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente resultando em compostos com propriedades cimentícias. São classificadas em dois grandes grupos: naturais e artificiais (MASSAZA, 1993).

Os materiais pozolânicos mais comumente utilizados na técnica de S/E são as cinzas volantes, poeiras de forno de cimento e escória de alto-forno, além de xistos calcinados, telhas e tijolos cerâmicos moídos e cinzas de carvão geradas em termoelétricas.

A NBR 12653/1992 caracteriza os materiais pozolânicos em três grupos, baseada exclusivamente na origem dos materiais:

**Classe N:** Pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos aplicáveis nessa Norma, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas ( $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) e argilas calcinadas.

**Classe C:** Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, que obedece aos requisitos aplicáveis nessa Norma.

**Classe E:** Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido nessa Norma.

Nota: Alguns materiais que se enquadram nessa classe podem apresentar propriedades aglomerantes.

**Tabela 2.1 - Exigências Químicas dos Materiais Pozolânicos**

| Propriedades  | Classes de Material Pozolânico |     |     |
|---|--------------------------------|-----|-----|
|   | N                              | C   | E   |
| $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , % mín. | 70                             | 70  | 50  |
| $\text{SO}_3$ , % máx.  | 4,0                            | 5,0 | 5,0 |
| Teor de umidade, % máx.   | 3,0                            | 3,0 | 3,0 |
| Perda ao fogo, % máx.   | 10,0                           | 6,0 | 6,0 |
| Álcalis disponíveis em $\text{Na}_2\text{O}$ , % máx.                   | 1,5                            | 1,5 | 1,5 |

Fonte: NBR 12653/1992.

Esses critérios são baseados em porcentagens mínimas e máximas abrangendo alguns aspectos do material tais como: constituintes químicos ( $\sum \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , teor de  $\text{SO}_3$ , teor de álcalis, etc.), finura (quantidade retida na malha  $45\mu\text{m}$ ).

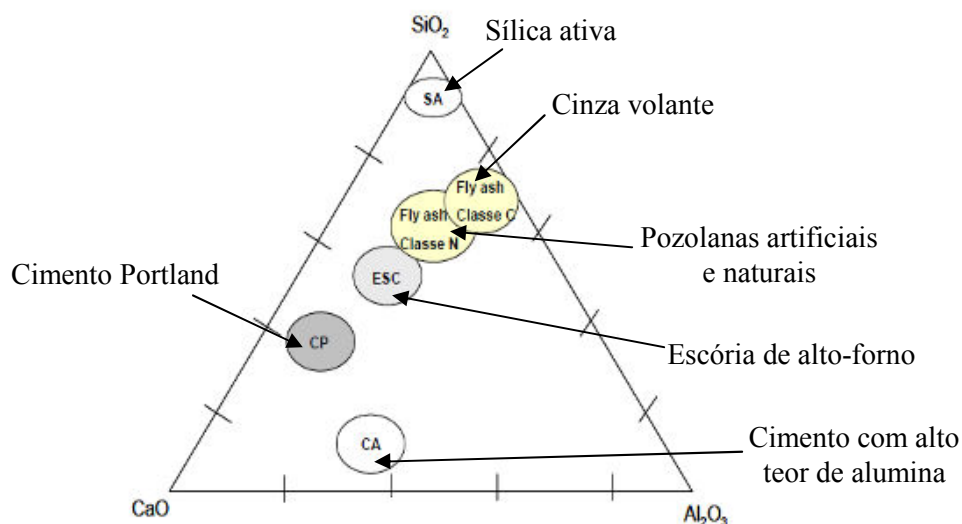
As exigências físicas para material considerado pozolânico são descritas na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2 - Exigências Físicas para os Materiais Pozolânicos**

| Propriedades  | Classes de Material Pozolânico |     |     |
|---|--------------------------------|-----|-----|
|   | N                              | C   | E   |
| Material retido na peneira $45\ \mu\text{m}$ , % máx      | 34                             | 34  | 34  |
| Índice de atividade pozolânica:                           | 75                             | 75  | 75  |
| - Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mín. |                                |     |     |
| - Com o cal aos 7 dias, em MPa                            | 6,0                            | 6,0 | 6,0 |
| - Água requerida, % máx.                                  | 115                            | 110 | 110 |

Fonte: NBR 12653/1992.

Na Figura 2.4 é apresentada de forma esquemática uma comparação da composição química do cimento Portland e outros materiais cimentícios.



**Figura 2.4 - Composição química do cimento Portland e outros materiais cimentícios**

Fonte: ROY e LANGTON (1989).

O que faz essa técnica ser uma das mais vantajosas é ter baixo custo de materiais empregados (pozolanas artificiais), disponibilidade de encontrá-los em grande escala, não necessitar de equipamentos especiais no processamento, além de poder apresentar alta resistência mecânica na matriz cimentícia ou cerâmica, em virtude das suas características químicas e físicas.

### **2.5.2.2 *Técnica baseada em cimento Portland***

Quando misturado com água e agregados, o cimento Portland é hidratado, formando posteriormente um sólido rígido. A hidratação se dá em dois estágios, sendo que o primeiro ocorre à formação de uma membrana na superfície das partículas de silicato de cálcio e no segundo, após a cura inicial, observa-se em cada grão de 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 laminais contínuas do material. Essa matriz cristalina incorpora os agregados e/ou resíduos adicionados na massa monolítica (CETESB, 1985 apud PABLOS, 2008).

As principais vantagens são o fato do comportamento do ligante estar bem estabelecido (manuseamento, mistura, presa e endurecimento), média permeabilidade, média/alta resistência mecânica das matrizes, custo relativamente baixo, poder ser usado para resíduos sólidos secos ou com elevada humidade, não exibir grande sensibilidade às variações químicas do resíduo e na ocorrência da elevada alcalinidade permitir a neutralização de resíduos com características ácidas (HUANG e CHU, 2003).

## **2.6 BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO (BCP)**

O concreto é o segundo material mais consumido pela humanidade, superado apenas pela água, um dos motivos deste elevado consumo é pelo fato de poder comparar-se a uma rocha artificial, que pode ganhar formas e volumes de acordo com as necessidades de cada obra (PIACCF/PR, 2008). Na construção civil, o ramo de pré-moldados ou pré-fabricados tem como finalidade, a produção de concretos fora do local de utilização definitiva, com emprego intensivo de maquinário e sob rigoroso controle de qualidade capaz de garantir a máxima uniformidade dos elementos.

Nesse segmento, o mercado em expansão é o de blocos de concreto utilizados para pavimentação, também chamados “Paver” (Figura 2.5), compõem os pavimentos intertravados utilizados em ruas, calçadas, calçadões praças e até em estradas. Os primeiros BCP foram produzidos na Alemanha no final do século XIX e já havia nessa época uma preferência muito significativa por esse produto (OLIVEIRA, 2004).



**Figura 2.5 – BCP ou Paver do tipo Holland**

**Fonte: [www.maski.com.br](http://www.maski.com.br)**

No início de 2004, na Colômbia, foi concluída a construção de 680 m de uma estrada na parte alta de Envigado, cidade a sudeste de Medellín. A estrada tem largura de 7m e foi executada com BCP de 80mm de espessura, assentes sobre uma base granular de 360 mm e um colchão de areia de 40 mm. O formato dos BCP foi o do tipo Holland - retangular de 200mm x 200mm, em padrão espinha-de-peixe, a Figura 2.6 apresenta os dois trechos deste pavimento.



**Figura 2.6 – Rodovia construída com BCP na Colômbia**

**Fonte: MADRID, 2004**

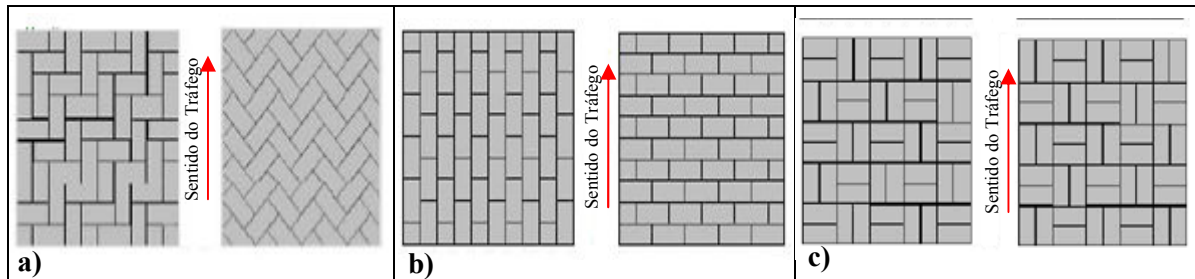
Na produção de BCP há a necessidade da utilização de uma vibro-prensa, que recebe essa denominação devido ao mecanismo de funcionamento empregado durante o processo de moldagem dos blocos, vibração associada à prensagem. A primeira função é responsável pelo preenchimento e adensamento da mistura nos moldes, sendo que a segunda influencia o adensamento e o controle da altura dos blocos (HOOD, 2006).

Segundo Rodrigues (1995) existe uma ordem preferencial de colocação dos materiais para produção dos BCP, iniciando pelo pedrisco ou brita zero e parte da água, ligando-se a misturadora por apenas alguns segundos, permitindo lavar o agregado, retirando o material fino que fica aderido às suas partículas. Em seguida aplica-se o cimento, misturando-o com o pedrisco, fazendo com que as partículas do agregado sejam envolvidas por uma camada de pasta de cimento, finalizando com a areia e o restante da água.

Após ocorrer a mistura, durante o processo de moldagem na vibro-prensa, o material é destinado à moldagem dos blocos que sofre compactação por meio de vibração para garantir que os blocos de concreto obtenham o grau de compactação previsto e atendam às características de projeto, devendo-se respeitar os tempos de alimentação e vibração do equipamento (HOOD, 2006).

Na Figura 2.7 são apresentados os três tipos de arranjos mais utilizados para assentamento de pavimentos intertravados. De acordo com Cruz (2003) a forma de arranjo escolhido para o assentamento, define a aparência estética do pavimento, não havendo um consenso sobre a interferência no formato de assentamento e o desempenho do pavimento, tendo em vista que para o boletim técnico do Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI), para

áreas com tráfego veicular é recomendada a tipologia de arranjo de espinha-de-peixe pelo seu desempenho na estrutura do intertravamento das peças.



**Figura 2.7 – Arranjo de assentamento: a) espinha-de-peixe ou ângulo reto; b) fileira e c) trama**

**Fonte: FIORITI, 2007.**

Algumas das principais vantagens da pavimentação com BCP (OLIVEIRA, 2004) são:

- a) Baixo custo de manutenção, sendo recomendada para regiões em fase de crescimento demográfico;
- b) pode ser posta em serviço imediatamente após a execução;
- c) proporciona boa superfície de rolamento para velocidade de até 80 km/h;
- d) utiliza mão-de-obra não especializada;
- e) efeito estético devido a diversidades nas formas e cores;
- f) baixo custo devido à fabricação industrializada;
- g) adequadamente projetada e executada, proporciona elevada vida útil.

São poucos os trabalhos disponíveis sobre a tecnologia de concreto para fabricação de BCP. Aparentemente, devido à dificuldade de acesso aos equipamentos de vibro-compressão e pelo fato dos concretos secos (tipo de concreto empregado na produção dos blocos para pavimentação) não alcançarem o mesmo *status* dos concretos convencionais e de alto desempenho (PETTERMANN, 2006).

## 2.6.1 Características a serem avaliadas na Produção de BCP

### 2.6.1.1 Granulometria

Do ponto de vista textural e de uma maneira geral, os materiais menores que 0,075 mm são denominados pó de pedra, quando fragmentados artificialmente e finos e denominados silte e argila, quando fragmentados naturalmente. Como agregado miúdo são considerados àqueles com granulometria entre 0,075 mm e 2,0 mm, para agregados artificiais (pedrisco fino e médio) e naturais (areia fina, média e grossa). Como agregados graúdo são considerados àqueles com granulometria entre 2,0 mm e 100,0 mm, em agregados artificiais (pedrisco grosso, brita do n.º 1 a 5) e natural, composto por areia grossa, pedregulho até pedra de mão, apresentados conforme Figura 2.8 (PIACCF/PR, 2008).

| MATERIAL ARTIFICIAL |              | MATERIAL NATURAL     |              |              |              |              |
|---------------------|--------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CLASSE TEXTURAL     | NBR 7225     | CLASSE TEXTURAL      | NBR 7225     | NBR 6502     | DNIT 2006a   | ASTM D 2487  |
| PO DE PEDRA         | < 0,075      | FINOS (SILTE/ARGILA) | < 0,075      | < 0,06       | < 0,075      | < 0,075      |
| AGREGADO MIÚDO      | 0,075 – 2,0  | AREIA                | 0,075 – 2,0  | 0,06 – 2,0   | 0,075 – 2,0  | 0,075 – 4,8  |
| Pedrisco fino       | 0,075 – 0,42 | fina                 | 0,075 – 0,42 | 0,06 – 0,20  | 0,075 – 0,42 | 0,075 – 0,42 |
| Pedrisco médio      | 0,42 – 2,0   | média                | 0,042 – 1,2  | 0,20 – 0,60  |              | 0,42 – 2,0   |
| AGREGADO GRAÚDO     | 2,0 – 100,0  | grossa               | 1,2 – 2,0    | 0,60 – 2,0   | 0,42 – 2,0   | 2,0 – 4,8    |
| Pedrisco grosso     | 2,0 – 4,8    | PEDREGULHO           | 2,0 – 100,0  | 2,0 – 60,0   | 2,0 – 75,0   | 4,8 – 75,0   |
| Brita 1             | 4,8 – 12,5   | fino                 | 2,0 – 4,8    | 2,0 – 6,0    | --           | 4,8 – 20,0   |
| Brita 2             | 12,5 – 25,0  | médio                | 4,8 – 25,0   | 6,0 – 20,0   | --           | --           |
| Brita 3             | 25,0 – 50,0  | grosso               | 25,0 – 50,0  | 20,0 – 60,0  | --           | 20,0 – 75,0  |
| Brita 4             | 50,0 – 75,0  | muito grosso         | 50,0 – 100,0 | --           | --           | --           |
| Brita 5             | 75,0 – 100,0 | PEDRA DE MÃO         | --           | 60,0 – 200,0 | 75,0 – 250,0 | 75,0 – 300,0 |
| BLOCO               | > 100,0      | MATACÃO              | > 100,0      | > 200,0      | > 250,0      | > 300,0      |

**Figura 2.8 – Comparativo de classes texturais, materiais naturais e artificiais segundo normas e instituições, com dimensões em mm**

**Fonte: PIACCF/PR, 2008**

Outro aspecto importante em função da granulometria é o efeito físico (efeito microfíler) que acontece pelo reduzido tamanho das partículas ( $\sim 0,1 \mu\text{m}$ ), que se introduzem entre os grãos de cimento e se alojam nos interstícios da pasta, reduzindo o espaço disponível para a água e atuando como ponto de nucleação dos produtos de hidratação, o que proporciona um refinamento da estrutura de poros (VIEIRA *et al.*, 1997).



### **2.6.1.2 Potencial Hidrogeniônico**

Para Reed *et al.*, (1996) alguns fatores podem interferir no processo de lixiviação e solubilização, que são: pH, capacidade de troca catiônica, granulometria e quantidade de matéria orgânica, segundo o autor, o aumento do pH, de modo geral, reduz a quantidade de metais solubilizados. Em pH elevado existe a predominância da precipitação da maioria dos metais como hidróxidos e carbonatos. A medida que o pH decresce, a precipitação torna-se menos importante e a troca catiônica passa a ser o mecanismo dominante na retenção de cátions metálicos.

Segundo Oliveira (2007) em seu estudo utilizando o metacaulim, pozolana silico aluminosa derivada da calcinação das argilas cauliniticas e os caulin, na produção de concretos de alto desempenho (CAD), constatou que pH dos concretos não apresentou diferença significativa com a elevação da proporção de metacaulim, relacionando a ligeira redução do pH dos concretos com metacaulim com consumo do hidróxido de cálcio pela reação pozolânica.

### **2.6.1.3 Resistência à Compressão**

Mehta e Monteiro (1994) definem a resistência de um material como sua capacidade de resistir à tensão sem ruptura, sendo que a ruptura é algumas vezes identificada com o aparecimento de fissuras. Ou seja, no caso de concretos, a resistência está relacionada com a tensão requerida para causar a fratura e, também, ao grau de ruptura no qual a tensão aplicada alcança seu valor máximo.

A resistência à compressão dos BCP é o principal parâmetro de controle de qualidade dos blocos, sendo que esse valor não exerce grande influência no comportamento estrutural dos pavimentos, quando limitada entre 20 e 60 MPa (SHACKEL, 1990).

De acordo com a NBR 9781/1987 a resistência, característica estimada à compressão dos BCP, calculada de acordo com as prescrições da NBR 9780/1987, deve ser  $\geq 35$  MPa para solicitações de veículos comerciais de linha e ou  $\geq 50$  Mpa, quando houver tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão.

#### **2.6.1.4 Absorção de Água**

Além da resistência a compressão, outro fator é a absorção de água, que ocorre na matriz cimentícia, e que segundo Pagnussat (2004) é uma característica importante no que se refere a concretos, porém, não existem muitas normas nacionais específicas para BCP, o que reflete diretamente na qualidade do bloco produzido, bem como das condições de serviço do pavimento. Os blocos de concreto que absorvem muita água em geral são menos resistentes, além de poderem lixiviar elementos químicos mais facilmente causando, por exemplo, eflorescências que prejudiquem o aspecto do pavimento.

No estudo realizado por Oliveira (2007), constatou-se que o efeito filler, relacionado a granulometria e a alta atividade pozolânica influenciaram na redução da absorção de água nos concretos produzidos com metacaulim. Outros estudos também mostraram que existe uma tendência a redução de absorção de água em blocos de concreto para pavimentação com substituição de superpozolanas (sílica ativa e metacaulim) ao cimento em relação aos mesmos sem adição, fato este, resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das pozolanas.

#### **2.6.1.5 Fluorescência de Raios - X (FRX)**

A fluorescência de raios-X é uma técnica analítica multielementar usada para obter informações qualitativas e quantitativas da composição elementar dos materiais, uma vez que este método é rápido e não destrutivo para a amostra. Além disso, a mesma tem se mostrado importante ferramenta na caracterização de materiais pozolânicos, por meio das quantidades de ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), correspondente as exigências químicas da NBR 12653/1992.

Na Tabela 2.3 são apresentados estudos de pozolanas e seus respectivos valores encontrados por meio do ensaio de fluorescência de raios-X.

Tabela 2.3 – Análise de Fluorescência de raios-X em estudos com resíduos

| Referências                    | Material                | Componentes (%)  |                                |                                |         |
|--------------------------------|-------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|
|                                |                         | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Σ Total |
| Lima e Toledo Filho, 2008      | Caulim                  | 45,70            | 38,60                          | 1,80                           | 86,1    |
|                                | Metacaulinita           | 52,46            | 44,24                          | 2,06                           | 98,8    |
|                                | Cimento V-ARI           | 24,94            | 7,50                           | 2,62                           | 35,1    |
| Tashima <i>et al.</i> , 2004   | Cinza da casca de arroz | 92,99            | 0,18                           | 0,43                           | 93,6    |
| Pettermann, 2006               | Sílica ativa            | 92,00            | 0,70                           | 1,20                           | 93,9    |
|                                | Metacaulim              | 54,70            | 41,80                          | 1,53                           | 98,0    |
| Gonçalves <i>et al.</i> , 2006 | Resíduo cerâmico        | 63,89            | 25,49                          | 7,73                           | 97,1    |
|                                | Cimento CII-F32         | 19,98            | 3,70                           | 3,12                           | 26,8    |
| Toledo, 2006                   | Poeira de jateamento    | 75,50            | 0,0                            | 0,70                           | 76,2    |
|                                | Areia de Fundição       | 92,66            | 2,0                            | 1,00                           | 95,7    |
| Oliveira e Barbosa, 2006       | Caulim # 200            | 47,41            | 38,0                           | 0,40                           | 85,8    |
|                                | Caulim # 325            | 45,70            | 39,30                          | 0,40                           | 85,4    |
| Sotero <i>et al.</i> 2009      | Lama vermelha           | 19,9             | 19,1                           | 40,2                           | 79,2    |
| Santos <i>et al.</i> 2007      | Cinza volante           | 41,79            | 38,21                          | 4,37                           | 84,4    |
| Magalhães, 2007                | Escória de auto-forno   | 33,04            | 12,10                          | 3,13                           | 48,3    |

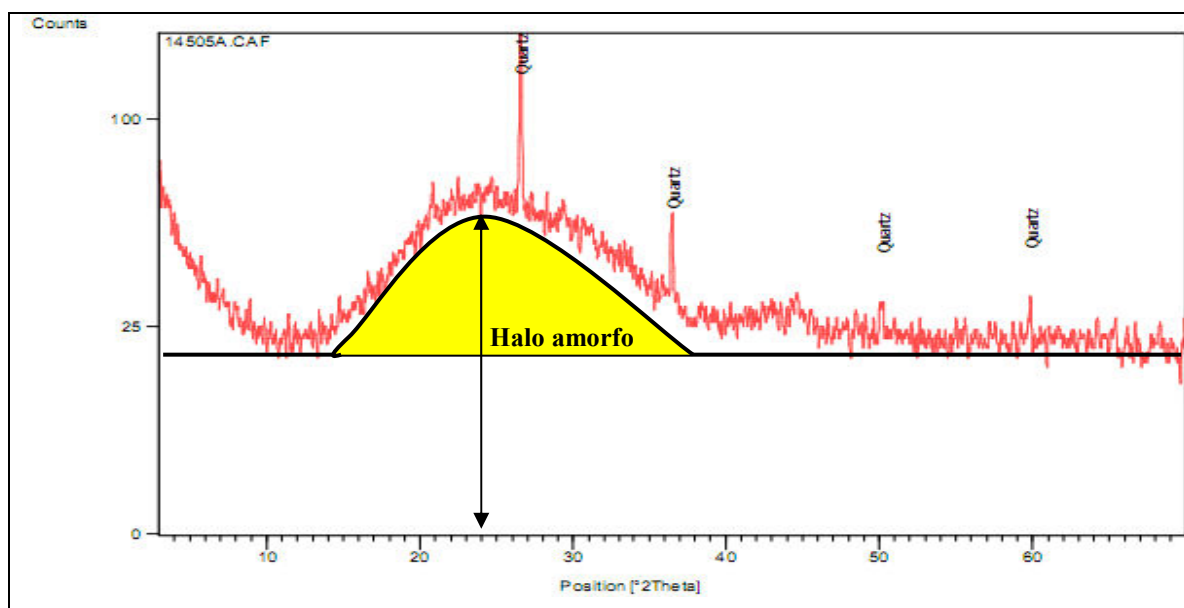
Em todos os estudos incorporando estes diferentes tipos de resíduos na matriz cimentícia ou cerâmica, observou-se que as exigências químicas para material pozolânico, com exceção da escória de auto-forno, superaram os limites de 70% mínimo na soma de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, descritos na .NBR 12653/1992 e na ASTM C618/1989.

#### 2.6.1.6 Difração de Raios-X

A difração de Raios-X é uma análise que permite a identificação das fases cristalinas e informações sobre a estrutura cristalográfica da amostra de um determinado material, além de permitir a quantificação das fases cristalinas e amorfas dos materiais (GOMES, 2005).

Em matrizes cimentícias a difração tem o papel de identificar qualitativa das fases cristalinas presentes nos agregados, bem como os compostos formados no processo de hidratação da pasta: quartzo, silicatos dicálcico ou belita, aluminatos e ferrita.

O difratograma de materiais considerados pozolanas apresenta um halo característico, e compostos cristalinos identificados como quartzo, mulita e hematita. O halo amorfo encontra-se aproximadamente na região de  $23,7^\circ 2\theta$  (HOPPE FILHO, 2008). E que foi observado por Toledo (2006) no difratograma (Figura 2.9) da poeira de jateamento, resíduo semelhante a um dos resíduos do presente estudo.



**Figura 2.9 – Difratograma da poeira de jateamento**

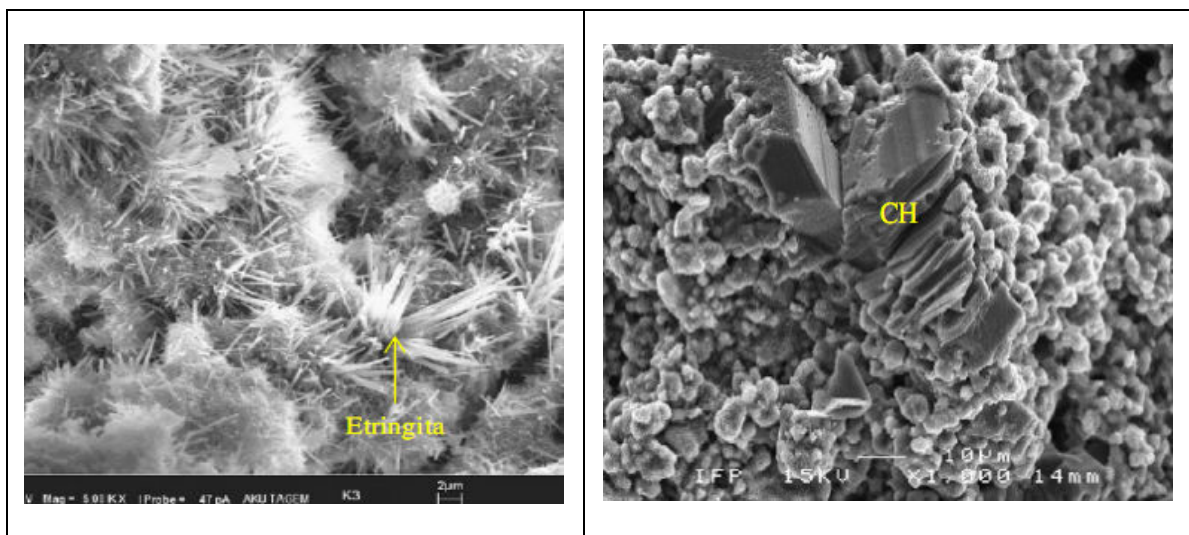
**Fonte: Adaptado, TOLEDO (2006).**

#### ***2.6.1.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) na hidratação da matriz cimentícia***

A análise de imagens exerce um papel importante, particularmente na tecnologia do concreto, pois com ela há possibilidade de relacionar, de alguma forma, a microestrutura com suas propriedades físicas e mecânicas. A matriz cimentícia é constituída por diferentes tipos de compostos hidratados do cimento Portland, entre eles estão o silicato de cálcio hidratado, o hidróxido de cálcio e os sulfoaluminatos de cálcio, além de partículas de clínquer não hidratadas.

Segundo Anjos (2009), os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 15 a 20% do volume de sólidos de uma pasta de cimento. A formação deste produto ocorre durante os primeiros estágios de hidratação sob a forma de trissulfato hidratado, conhecido como etringita (Figura 2.10a). O hidróxido de cálcio, também conhecido com portlandita, representa 20 a

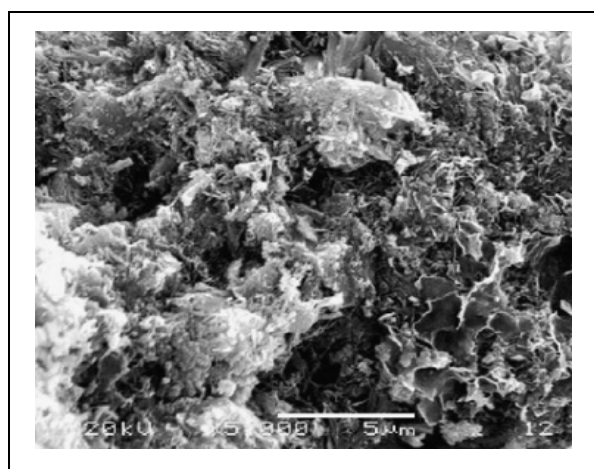
25% do volume de sólidos de uma pasta de cimento hidratada, tende a formar cristais grandes, sob a forma de prismas hexagonais distintos como é mostrado na Figura 2.10b.



**Figura 2.10 – Morfologias típicas da etringita e potlandita**

**Fonte: DEMIR (2008) e MÉDUCIN, *et al.* (2007).**

A fase silicato de cálcio hidratado (C-S-H) constitui de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratada, sendo o principal responsável pelas propriedades mecânicas da pasta, a Figura 2.11 apresenta as morfologias típicas comumente encontradas para este composto quando hidratado a temperatura ambiente.



**Figura 2.11 - Morfologia típica do C-S-H amorfo**

**Fonte: QIAO, *et al.* (2008).**

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

A indústria da construção civil destaca-se pelo potencial absorvedor de resíduos industriais, principalmente porque lança mão de processos de S/E de resíduos na produção de seus produtos. De acordo com Luz (2001) dependendo das características físicas e químicas do resíduo, esta técnica pode permitir a obtenção de novos materiais a partir de subprodutos como, por exemplo, os blocos de concreto para pavimentação (BCP).

Alguns pesquisadores vem utilizando o processo de estabilização de resíduos perigosos contendo metais pesados por meio da solidificação em matrizes de cimento Portland, dentre eles pode-se citar, Shi e Fernández-Jiménez (2006), Katsioti *et al.* (2008), Hekal *et al.* (2011), Cheilas *et al.* (2007), Shi e Spence (2004), Cioffi *et al.* (2001), Valls e Vázquez (2000) e Shao *et al.* (2000).

No Brasil podem ser citados os trabalhos desenvolvidos por, Gollmann *et al.* (2010), Magalhães (2007), Oliveira (1996), Santos *et al.* (2007) e Pablos (2008), em matriz cimentícia. Além de pesquisas com diversos tipos de resíduos na produção de blocos de concreto para pavimentação, realizadas por, Hood (2006), Pagnussat (1995), Pettermann (2006) e Sotero *et al.* (2009).

Gollmann *et al.* (2010) no trabalho com resíduos de Chumbo, provenientes de indústrias de mineração e metalurgia, observaram que na substituição de 10% do cimento pelo resíduo, apesar do resíduo gerar redução na resistência a compressão, a estabilização do Pb em matriz cimentícia foi positiva.

Pablos (1995) em seu estudo do desempenho das matrizes de cimento Portland produzidas utilizando areia de fundição aglomeradas com argila, em várias proporções, verificou-se que a bentonita sódica e a sílica ativa contribuíram para o aumento da eficiência de fixação dos metais Al, Fe e Cr.

Oliveira (1996) utilizando o processo de S/E para o mesmo resíduo foi encontrado concentrações de metais abaixo dos limites estabelecidos para o ensaio de lixiviação (anexo F) da NBR 10004/2004, porém no ensaio de solubilização o valor das concentrações de cromo e alumínio mostraram-se acima dos valores permitidos para o anexo G da norma, não permitindo a classificação desse resíduo como resíduo classe II A (não perigoso, não inerte).

No estudo realizado por Shi e Fernández-Jiménez (2006), sobre a estabilização de resíduos perigosos e radioativos em matriz de cimento Portland e matriz cimentícia, com cimento álcali-ativado com ativadores alcalinos (escória de alto-forno, cinzas volantes de carvão, escória de fósforo, de aço, metacaulim ou ainda, combinação de dois ou mais deles), verificou-se que a lixiviação de contaminantes dos resíduos perigosos e radioativos, com cimento álcali-ativado foi menor do que a encontrada na matriz com cimento Portland, concluindo que para esses tipos de resíduos, a melhor forma de solidificação/estabilização é por meio da matriz constituída de cimento álcali-ativado.

Para Katsioti *et al.* (2008) uma das formas mais eficientes de se estabilizar metais considerados perigosos, em matriz cimentícia, é por meio da utilização de materiais pozolânicos juntamente com cimento Portland e resíduo. Nesse estudo, os autores utilizaram 50% de lodo (esgoto sanitário + efluente industrial) com alta concentração de metais pesados, 20% de bentonita (argila-pozolânica) e 30% de cimento Portland, a utilização da bentonita fez com que não houvesse interferências negativas nas reações de hidratação do cimento com os agregados. Concluindo que a adição da bentonita na matriz promoveu a redução da lixiviação e da toxicidade das argamassas contendo o lodo.

Em mais um estudo com adição da bentonita, Brito e Soares (2009), realizaram testes em matriz cimentícia com três tipos de tratamentos (B, C e D) com 40, 50 e 60%, respectivamente, de contaminantes na solução aquosa de óxidos de  $Cd^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  e  $Cu^{2+}$ , além de cimento Portland comum, bentonita sódica e hidróxido de cálcio. Os tratamentos B, C e D mostraram que as concentrações do extrato lixiviado e solubilizado aumentam em função da adição da quantidade de cádmio, chumbo e cobre. A amostra B foi considerada um material estabilizado com restrição resíduo classe II A (não perigoso, não inerte). A amostra C no ensaio de lixiviação, apresentou concentrações de cádmio acima do recomendado na legislação, devendo seus resíduos após uso, ser classificado como resíduo classe I (perigoso). O material D, de acordo com os autores, apresentou metais que solubilizaram quando do ensaio de solubilização, devendo, portanto seus resíduos, após uso, serem classificados como resíduo classe II A (não perigoso, não inerte). Os autores concluíram que mesmo com esses resultados, o uso da bentonita e do hidróxido de cálcio pode ser considerada para retenção de metais pesados, podendo minimizar a lixiviação e a solubilização para o ambiente.

Giffoni e Lange (2005) no estudo da incorporação da borra de fosfato para fabricação de tijolos, o resíduo da borra, gerado na etapa de pintura em superfícies metálicas em

galvanoplastia, encontraram resultados de lixiviação abaixo dos valores permitidos no anexo F da NBR 10004/2004, classificando-a como o resíduo como resíduo classe II A (não perigoso, não inerte), tendo em vista que o extrato solubilizado apresentou resultados acima do limite estabelecido pelo anexo G da norma para os metais alumínio, manganês, zinco e sódio.

Ghosh e Subbarao (1998) realizaram um estudo para verificar o efeito das cinzas volantes (leve estabilizada com cal) aplicadas à matriz cimentícia, a fim de verificar as condições de lixiviação, constatando que o encapsulamento dos metais na matriz cimentícia contribuiu para a diminuição da lixiviação dessas nas amostras.

Dentre todos os trabalhos utilizando resíduos sólidos em matriz cimentícia, observou-se que em sua maioria, quando incorporado materiais considerados pozolânicos, as amostras não eram submetidas a ensaios de lixiviação e solubilização, sendo considerado apenas as características físicas, microestruturais e mecânicas. Observou-se também na técnica de solidificação/estabilização, para que se tenha resultados mais consistentes, deve-se avaliar não só os aspectos químicos como a lixiviação e solubilização, que são essenciais, mas também deve ser feita uma abordagem geral no que se refere às características unitárias do material, bem como os aspectos da matriz, desde composição física, química, microestrutural até as mecânicas, que foram as mais abordadas nos trabalhos citados.

### **3.1 APLICAÇÃO DE RESÍDUOS EM BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO**

Estudar as possibilidades de reciclagem de resíduos em materiais de construção adquire uma nova dimensão, que extrapola a intenção pura e simples de desenvolver um novo produto. Dentro de uma abordagem holística, deve-se pensar em trabalhos que envolvam reciclagem como contribuinte na criação de subprodutos com valor agregado, bem como suscitadores de discussões mais amplas de desenvolvimento sustentável (PAGNUSSAT, 2004). E é com essa visão que alguns trabalhos tem sido feitos, voltados principalmente para o ganho ambiental, tendo em vista a grande quantidade de resíduos gerados no setor industrial e com potencial de utilização como agregados.

A produção de blocos de concreto para pavimentação tem demonstrado um grande potencial de expansão de mercado, tornando as pesquisas relacionadas à incorporação de resíduos neste tipo de configuração um assunto a ser explorado.



Hood (2006) realizou em sua pesquisa a utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) em substituição ao agregado miúdo (areia) nas proporções 0, 25, 50, 75 e 100%, com o objetivo de investigar o espectro de possibilidades de utilização do RCD como agregado miúdo. Basicamente o autor se ateve a três parâmetros: absorção de água, resistência a abrasão e resistência a compressão. A taxa de absorção de água teve intensa relação com o aumento das proporções de RCD na matriz, assim como para a resistência a abrasão, em que o índice de desgaste aumentou conforme aumentava as proporções de resíduo. Com relação à resistência a compressão (28 dias), o autor considerou viável tecnicamente a utilização 25% de RCD, na matriz cimentícia para a produção de blocos de concreto para pavimentação, mesmo não alcançando o limite de 35MPa da norma. O autor concluiu que para 50, 75 e 100% de substituição, a produção de blocos não se caracteriza como viável tecnicamente.

Pagnussat (2004) em seu trabalho discorre sobre a avaliação da utilização de escórias granuladas de fundição (EGF), em substituição parcial (10, 30 e 50%) ao cimento e (10, 30 e 50%) do agregado miúdo (areia média), na fabricação de blocos de concreto para pavimentação.

O autor verificou que, aos 28 dias, a taxa de absorção de água de todos os pavimentos fabricados com EGF, em substituição ao cimento, manteve-se com valores próximos àqueles obtidos com o corpo de prova referência.

No que diz respeito à resistência a abrasão, os blocos fabricados com 10% de EGF em substituição ao cimento, apresentaram índice de desgaste inferior ao bloco referência. Com relação à resistência a compressão todos os corpos de prova apresentaram resistências inferiores ao do bloco referência.

Nas substituições de EGF ao agregado miúdo, a taxa de absorção de água aumentou ligeiramente conforme aumentava a substituição. Quanto à resistência a abrasão, o autor verificou que conforme aumentava a proporção de EGF, os valores do índice de desgaste sofriam ligeiro aumento. Para a resistência a compressão foi verificado que o corpo de prova com 50% de EGF, apresentou valores de resistência maiores que àqueles obtidos para as demais substituições, no entanto, menores do que as do bloco referência. A partir desses resultados, o autor considera a EGF como um potencial subproduto passível de utilização como insumo para a construção civil.

Pettermann, (2006) utilizou dois resíduos considerados altamente pozolânicos, a sílica ativa (SA) e o metacaulim (MC), substituindo-os em 10% em relação ao cimento. Para a resistência a compressão (28 dias), devido a atividade pozolânica na matriz, os valores encontrados para os blocos fabricados com SA foi de 40MPa e para o MC de 35MPa, valores superiores em relação aos blocos referência que apresentaram 34MPa.

O autor verificou que os blocos com substituições de cimento por superpozolanas absorveram menos água, principalmente quando foi utilizada sílica ativa, evidenciando o potencial de utilização desses dois materiais.

Para avaliar a utilização de resíduos como aditivos ou substituintes em matriz cimentícia, deve-se levar em consideração não só aspectos físicos e mecânicos, descritos nos trabalhos apresentados, mais sim avaliar os resíduos em função de características tão importantes quanto essas como as características químicas e microestruturais.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia para o desenvolvimento do trabalho foi desenvolvida de acordo com fluxograma apresentado na Figura 4.1.

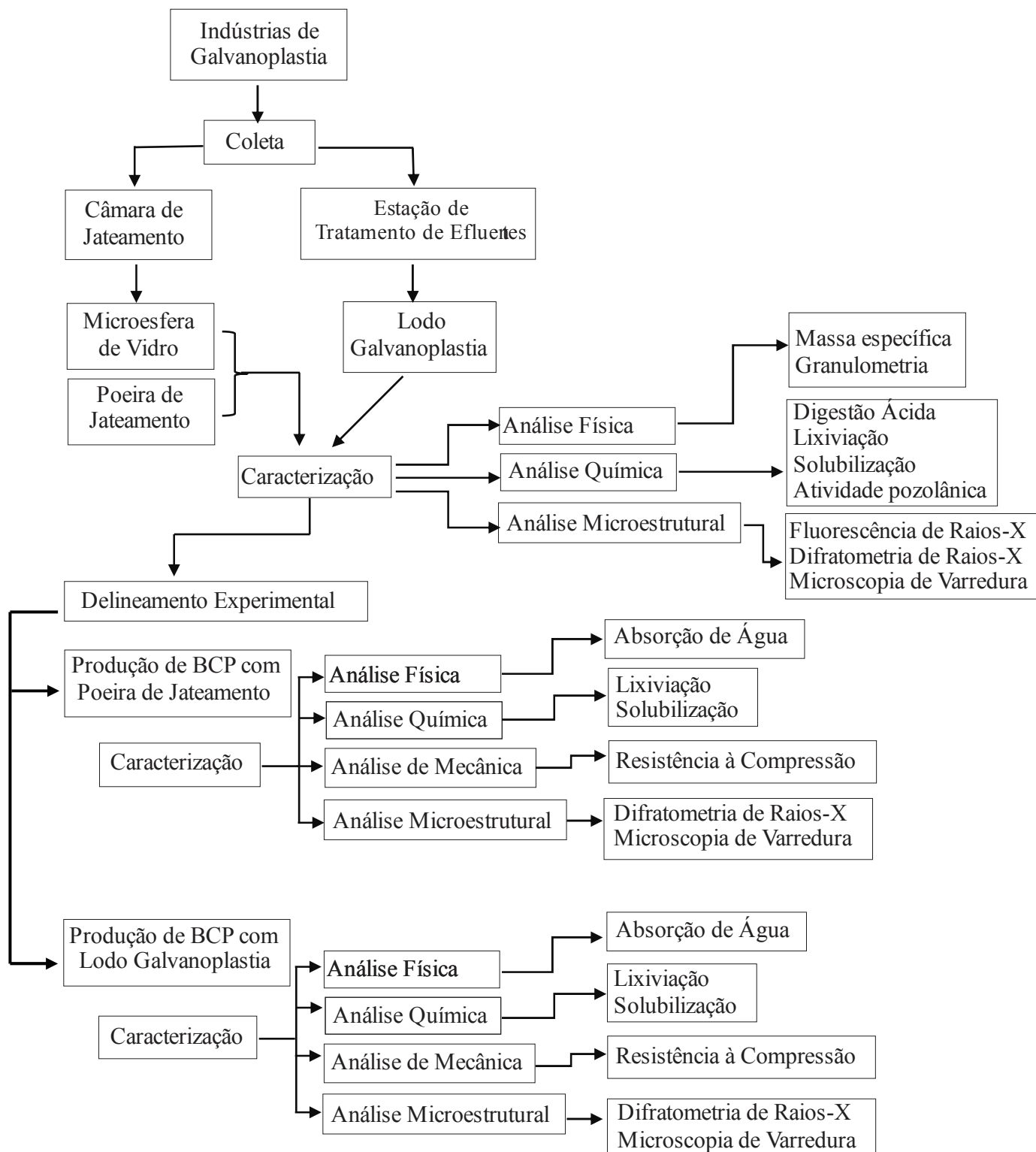


Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa

#### 4.1 COLETA DA MICROESFERA DE VIDRO E DOS RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA

A microesfera de vidro (material utilizado na indústria para o processo de jateamento) e os resíduos de galvanoplastia (Figura 4.2) foram coletados diretamente nas indústrias geradoras, na região de Maringá – PR.

A microesfera de vidro (matéria-prima) e a poeira de jateamento (resíduo gerado) foram fornecidas por uma indústria de resistências elétricas, a qual gera uma quantidade de poeira de jateamento é de cerca de 200,0 kg/mês.

O lodo de galvanoplastia foi coletado na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) no estado seco (torrões), em uma indústria de aço inox, a qual gera cerca de 205,0 kg/mês, para adquirir a textura mais fina, os torrões foram triturados e submetidos ao peneiramento.

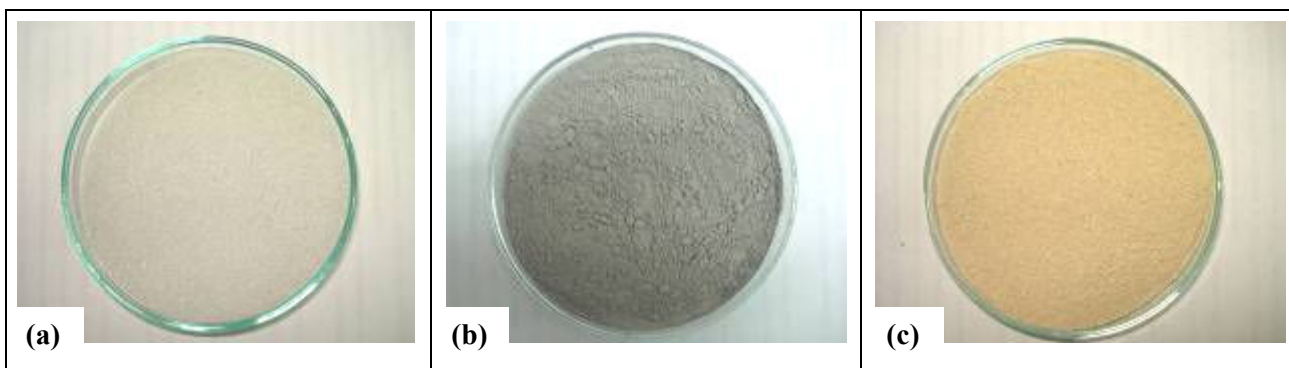


Figura 4.2 – a) Microesfera de vidro, b) poeira de jateamento e c) lodo de galvanoplastia

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA MICROESFERA DE VIDRO E DOS RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA

As seguintes análises foram realizadas para determinar as características e composição dos materiais:

- Determinação Física: massa específica, granulometria;
- Determinação Química: digestão ácida, lixiviação, solubilização, pH e atividade pozolânica;
- Determinação Microestrutural: fluorescência de raios-X, difratometria de raios-X e microscopia de varredura.

As amostras foram pesadas e submetidas à secagem em estufa por 24 horas a uma temperatura de 110°C.

Tendo em vista que a microesfera de vidro é utilizada como matéria-prima introduzida nas câmaras de jateamento, gerando a poeira de jateamento como resíduo, todos os resultados referentes à sua caracterização física, química e microestrutural foram apresentadas no apêndice 1 deste trabalho.

#### **4.2.1 Caracterização Física**

Os resíduos de galvanoplastia e a microesfera de vidro foram submetidos às análises de granulometria segundo a NBR 7181/1984 combinada de peneiramento e sedimentação. O ensaio da massa específica foi realizado conforme a NBR 6508/1984 por meio da utilização de peneiramento e picnômetro. Estas análises foram realizadas no laboratório de Construção Civil da Universidade Estadual de Maringá - UEM.

#### **4.2.2 Caracterização Química – processo de abertura da amostra**

A caracterização química foi realizada no laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental do Departamento de Engenharia Química (LGCPA/UEM) e Centrais de Apoio a Pesquisa da Universidade Estadual de Maringá (COMCAP/UEM).

##### ***4.2.2.1 Digestão Ácida***

A metodologia de extração de metais por digestão ácida a quente nítrico-perclórica, foi realizada segundo Malavolta *et al.* (1997) e a leitura dos metais foi por meio de Espectrômetro de Absorção Atômica, Varian - SPECTRAA-240FS.

##### ***4.2.2.2 Ensaio de Lixiviação e Solubilização***

O procedimento utilizado na obtenção do extrato lixiviado para os resíduos de galvanoplastia seguiu a NBR 10005/2004, assim como o procedimento da extração do solubilizado seguiu a NBR 10006/2004. Sendo que, as amostras de lixiviado e solubilizado foram submetidas à determinação dos teores de contaminantes listados segundo os anexos F e G da NBR 10004/2004, por meio de Espectrômetro de Absorção Atômica (EAA)

Varian - SPECTRAA-240FS e Cromatógrafo de íons, Metrohm – 850 Professional IC, com parâmetros técnicos de calibração segundo a Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Parâmetros técnicos para leitura em EAA e cromatógrafo de íons**

| <b>Elemento</b> | <b>Comprimento de onda (nm)</b>                           | <b>Larg. da banda espectral (nm)</b> | <b>Método</b>                 |
|-----------------|---|--------------------------------------|-------------------------------|
| Ag - Prata      | 328,1   | 0,5                                  | Chama -Acetileno              |
| Al - Alumínio   | 309,3   | 0,5                                  | Chama - Acet./Óx. Nitroso     |
| As - Arsênio    | 193,7   | 0,3                                  | Chama - Acet./Óx. Nitroso     |
| Ba - Bário      | 553,6   | 0,5                                  | Chama - Acet./Óx. Nitroso     |
| Cd - Cádmio     | 228,8   | 0,5                                  | Chama - Acetileno             |
| Cloreto         | Cromatografia (líquida) de íons Metrohm – Coluna A Supp 5 |                                      |                               |
| Cr - Cromo      | 357,9   | 0,2                                  | Chama - Óxido nitroso         |
| Cu - Cobre      | 324,8   | 0,5                                  | Chama - Acetileno             |
| Fe - Ferro      | 248,3   | 0,2                                  | Chama - Acetileno             |
| Fluoreto        | Cromatografia (líquida) de íons Metrohm – Coluna A Supp 5 |                                      |                               |
| Hg - Mercúrio   | 253,7   | 0,5                                  | Vapor a frio                  |
| Mn - Manganês   | 279,5   | 0,2                                  | Chama - Acetileno             |
| Na - Sódio      | 330,3   | 0,5                                  | Chama - Acetileno             |
| Nitrato         | Cromatografia (líquida) de íons Metrohm – Coluna A Supp 5 |                                      |                               |
| Pb - Chumbo     | 247,4   | 1,0                                  | Chama - Acetileno             |
| Se - Selênio    | 196,0   | 1,0                                  | Forno de grafite/ Óx. Nitroso |
| Sulfato         | Cromatografia (líquida) de íons Metrohm – Coluna A Supp 5 |                                      |                               |
| Zn - Zinco      | 213,9   | 1,0                                  | Acetileno                     |

#### **4.2.2.3 Determinação do Potencial Hidrogeniônico**

A determinação do potencial hidrogeniônico (pH) dos resíduos de galvanoplastia e da microesfera de vidro, foi realizada de acordo com os procedimentos recomendados na NBR 10005 (2004), e consistiu na transferência de 5 g de amostra seca para um Becker (250 ml), adicionando-se 96,5 ml de água desionizada, após, agitando-se vigorosamente por 5 minutos com agitador magnético (Figura 4.3a), por fim, mediu-se o pH por meio de pHômetro (Figura 4.3b).

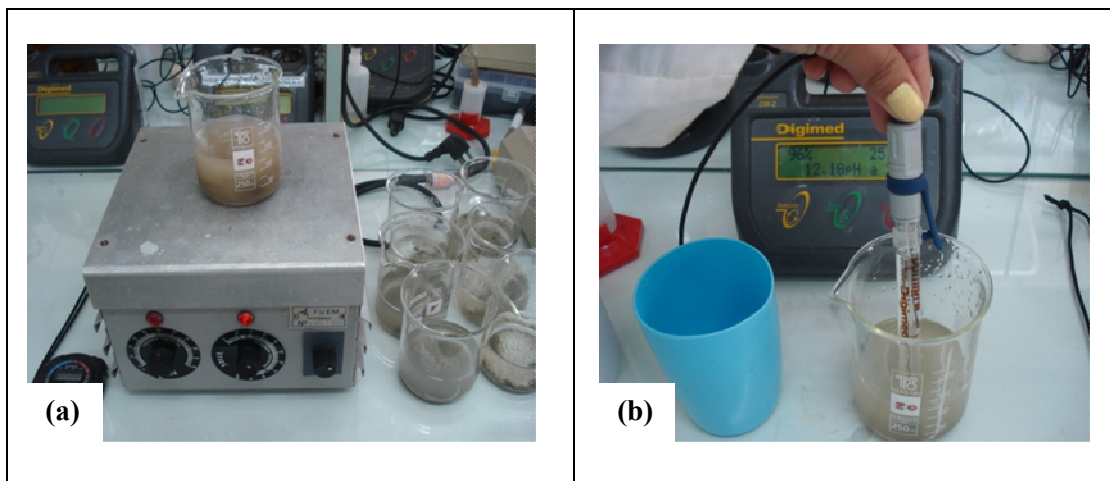


Figura 4.3 – a) agitador magnético e b) pHômetro

#### 4.2.2.4 Ensaio de Atividade Pozolânica

A determinação da atividade pozolânica foi realizada segundo o método Chapelle Modificado, procedimento CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-041 do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT-SP), o qual se refere a uma medida quantitativa da atividade de uma pozolana (RAVERDY *et al.*, 1980). O ensaio é realizado em uma suspensão de 1g CaO puro proveniente da calcinação do  $\text{CaCO}_3$ , juntamente com 1g de pozolana em 250 mL de água. A mistura é transferida para um erlenmeyer e deixada em banho-maria na temperatura de  $90^\circ\text{C}$ , com agitação mecânica por 16 horas. Após o resfriamento da solução em temperatura ambiente, é acrescentada solução de sacarose seguida de agitação. Na filtração da solução resultante adiciona-se fenolftaleína como indicador e faz-se a titulação com  $\text{HCl } 0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ . A atividade pozolânica por Chapelle é calculado conforme a Equação 1.

$$\text{mg CaO/g de material} = 28 \times \frac{(V_3 \times m_3 - V_2 \times m_4)}{m_4 \times m_3 \times m_2} \times F_c$$

**Equação 1**

onde,

$m_2$  – massa de material pozolânico em g;

$m_3$  – massa de CaO empregado no ensaio com a amostra;

$m_4$  – massa de CaO empregado no ensaio em branco;

$V_2$  – volume de HCl 0,1 mol.L<sup>-1</sup> consumido no ensaio com amostra em ml;

$V_3$  – volume de HCl 0,1 mol.L<sup>-1</sup> consumido no ensaio em branco;

$F_c$  – fator de correção do HCl para uma concentração de 0,1N.

### **4.2.3 Caracterização Microestrutural**

Para a determinação das características microestruturais, as amostras foram secas por 24 horas em estufa a temperatura de 110°C. Os ensaios foram realizados na Central de Análises Avançadas de Materiais, do Complexo de Centrais de Apoio a Pesquisa da Universidade Estadual de Maringá (CAM/COMCAP/UEM).

#### **4.2.3.1 Fluorescência de Raios-X (FRX)**

Na análise de fluorescência utilizou-se 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 da Universidade Federal do Ceará (UFC).

#### **4.2.3.2 Difração de Raios-X (DRX)**

O ensaio de difração de raios-X foi utilizado para detectar as fases cristalinas presentes em cada amostra. Os elementos químicos de interesse para o presente trabalho foram: Ca, Mg, Si, H e O e as fases de interesse foram: CSH e CH. Utilizou-se o equipamento modelo Bruker-AXS, D8 Advance (radiação Cu k $\alpha$ , corrente de 35 mA e voltagem de 40 kV, com ângulo de difração 2 $\theta$  entre 10° a 100°, na velocidade de 0,004°s<sup>-1</sup>).

#### **4.2.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

As micrografias foram obtidas por meio de microscópio eletrônico de varredura de elétrons Superscan SS - 550 marca Shimadzu, operando com tensão de aceleração de 10 kV, com capacidade de aumento de 60 a 6.000 vezes e as imagens obtidas foram registradas em arquivo digital.



### 4.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL PARA FABRICAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO (BCP)

#### 4.3.1 Traço dos Corpos de Prova

Cada método de dosagem busca alcançar sempre o critério de desempenho exigido pela norma, neste caso, a resistência à compressão. Devido à inexistência de prescrição normativa para dosagem de blocos de concretos para pavimentação e como cada método está intimamente relacionado com as características particulares de cada máquina vibro-compressora, gerou-se um traço conforme a Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 - Composição dos traços dos BCP**

| Proporção de substituição |      |      |     |     |      |        |      |      |     |     |      |
|---------------------------|------|------|-----|-----|------|--------|------|------|-----|-----|------|
| Traço                     | a/ac | cim  | a   | p   | PJ   | Traço  | a/ac | cim  | a   | p   | LG   |
| REF                       | 0,40 | 1,0  | 2,5 | 1,3 | -    | REF    | 0,40 | 1,0  | 2,5 | 1,3 | -    |
| 5% PJ                     | 0,40 | 0,95 | 2,5 | 1,3 | 0,05 | 5% LG  | 0,35 | 0,95 | 2,5 | 1,3 | 0,05 |
| 10% PJ                    | 0,40 | 0,90 | 2,5 | 1,3 | 0,10 | 10% LG | 0,32 | 0,90 | 2,5 | 1,3 | 0,10 |
| 15% PJ                    | 0,40 | 0,85 | 2,5 | 1,3 | 0,15 | 15% LG | 0,37 | 0,85 | 2,5 | 1,3 | 0,15 |
| 20% PJ                    | 0,40 | 0,80 | 2,5 | 1,3 | 0,20 | 20% LG | 0,35 | 0,80 | 2,5 | 1,3 | 0,20 |
| 25% PJ                    | 0,40 | 0,75 | 2,5 | 1,3 | 0,25 | 25% LG | 0,42 | 0,75 | 2,5 | 1,3 | 0,25 |

REF – corpo de prova sem substituição ou referência

cim – cimento

PJ – Poeira de jateamento

a – areia

a/c – relação água/cimento

p – brita ou pedrisco

LG – (em base seca) Lodo de galvanoplastia

#### 4.3.1.1 Cimento

O cimento empregado na fabricação dos blocos de concreto para pavimentação deste trabalho foi o cimento Portland CPV – ARI (NBR 5733/1991), por apresentar baixo teor de adição mineral, alta resistência inicial e alta reatividade em baixas idades, permitindo à rápida desforma dos pavimentos.

A Tabela 4.3 apresenta as especificações do cimento CPV-ARI, segundo dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 4.3 - Características do aglomerante (CPV-ARI)

| Composição Química (%)         |  |                                    |            |                      |                        |                        |                       |                       |                          |
|--------------------------------|--|------------------------------------|------------|----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|
| <i>SiO<sub>2</sub></i>         | <i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>         | <i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> | <i>CaO</i> | <i>MgO</i>           | <i>Ca<sub>2</sub>O</i> | <i>Na<sub>2</sub>O</i> | <i>SO<sub>2</sub></i> | <i>CO<sub>2</sub></i> | <i>Resíduo Insolúvel</i> |
| 20,03                          | 4,36                                       | 3,5                                | 62,51      | 1,70                 | 0,78                   | 0,11                   | 3,25                  | 0,55                  | 0,38                     |
| Características Complementares |  |                                    |            |                      |                        |                        |                       |                       |                          |
| #200 (%)                       | Blaine (cm <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> ) | Expansão a quente (mm)             | Água (%)   | Início de pega (min) | Fim de pega (min)      |                        |                       |                       |                          |
| 0,3                            | 5100                                       | 0                                  | 28         | 160                  | 270                    |                        |                       |                       |                          |

Fonte: Indústria de Cimento Portland.

A Figura 4.4 apresenta a evolução da resistência à compressão do cimento CPV – ARI, utilizado no presente estudo.

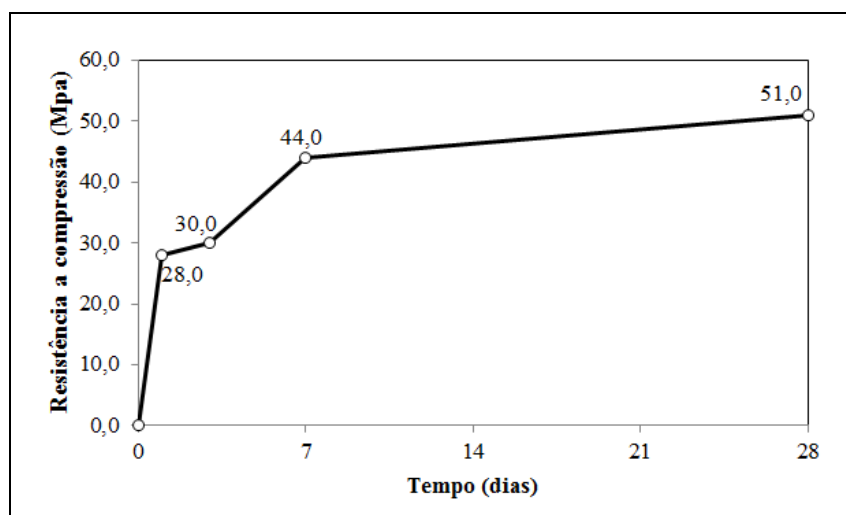


Figura 4.4 – Evolução da resistência à compressão do cimento CPV-ARI

Fonte: Indústria de Cimento Portland

#### 4.3.1.2 Água

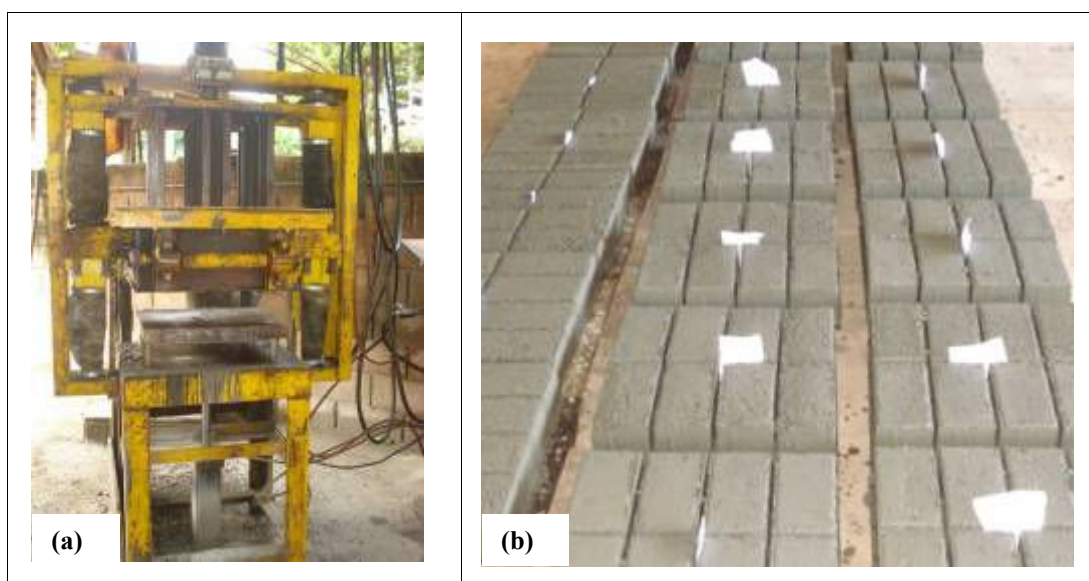
A água utilizada na produção dos BCP foi à disponível para abastecimento local, fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) no município de Maringá – PR.

#### 4.3.1.3 Agregados: Areia e Brita

Os agregados utilizados na produção dos pavimentos foram submetidos às análises de granulometria conforme a NBR 7217 (1987), massa específica conforme a NBR 7251 (1982) e massa unitária nos estados solto e compactado, conforme a NBR NM52 (2009).

### 4.3.2 Produção dos Corpos de Prova

O processo teve como primeira etapa a pesagem dos materiais secos e a posterior transferência para a betoneira de eixo vertical, sendo primeiramente transferidos o pedrisco e parte da água, em seguida o cimento, agregados miúdos e o restante da água. O concreto produzido foi então transferido para a vibro-prensa semi-automática pneumática com vibro-prensagem em ciclos de vibração de 30 segundos (Figura 4.5a), com capacidade de produção de oito blocos por ciclo, pertencente ao Laboratório de Artefatos da Universidade Estadual de Maringá (UEM-PR).



**Figura 4.5– a) Vibro-prensa e b) corpos de prova produzidos**

A última etapa do processo correspondeu à disposição dos blocos em chapas de madeira, ilustrada na Figura 4.5b, e após a desforma, foi realizado a cura em câmara úmida até as idades determinadas para os ensaios no Laboratório de Construção Civil (P02/UEM-PR).

Para a realização do programa experimental foram produzidos 360 pavimentos com dimensões de 100 mm (largura) x 200 mm (comprimento) x 80 mm (altura), sendo 60 destinados a dosagem do concreto referência, 150 para o ciclo com agregados reciclados composto pela poeira de jateamento e 150 para o ciclo composto pelo lodo de galvanoplastia.

### 4.3.3 Caracterização Física dos BCP com os resíduos de galvanoplastia

#### 4.3.3.1 Ensaio de Absorção de Água (AA)

Para o ensaio de absorção de água por imersão, foram empregados em três corpos de prova de cada proporção de substituição da poeira de jateamento e para o lodo de galvanoplastia em todas as idades de cura, seguindo a metodologia proposta pela NBR 12118/2010, que determina os procedimentos para verificar a absorção de água para blocos de concreto de alvenaria. O ensaio consistiu em secar os blocos em estufa a 110°C, após esta etapa os mesmos foram resfriados em temperatura ambiente e imersos em água. Então, após 24 horas foram realizadas as medições e depois de 2 em 2 horas ou até que não registrem diferença de massa superior que 0,5% entre duas leituras consecutivas. Para tanto, o valor da absorção considerou a massa do bloco saturado de água e após seco em estufa, calculado por meio da Equação 2:

$$a.a\% = 100 \times \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \quad \text{Equação 2}$$

em que,

a.a%: absorção de água;

$m_1$ : massa do BCP após secagem em estufa;

$m_2$ : massa do BCP saturado em água.

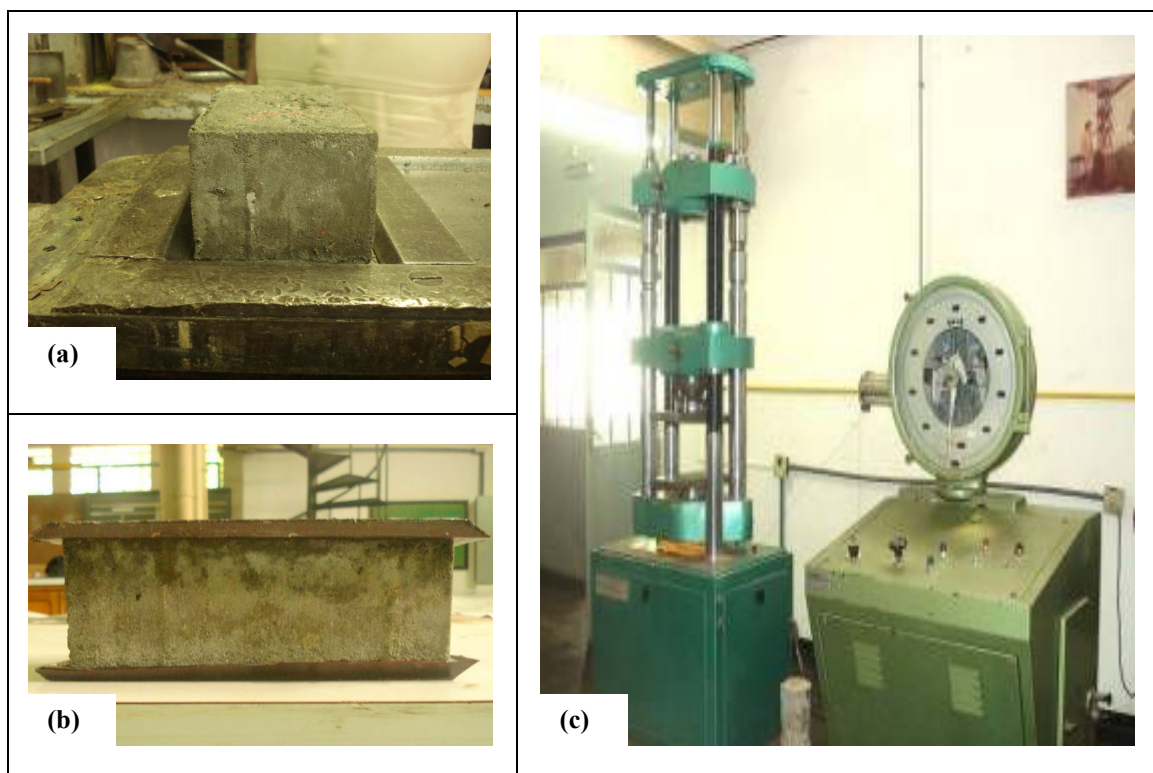
### 4.3.4 Caracterização Mecânica dos BCP com os resíduos de galvanoplastia

#### 4.3.4.1 Ensaio de Resistência a Compressão

A resistência a compressão é um parâmetro fundamental a ser considerado na produção de blocos de concreto para pavimentação. Nesse sentido, resistências satisfatórias em baixas idades são essenciais devido à desforma, cura, armazenamento e transporte ocorrerem de maneira acelerada.

Na realização dos ensaios de resistência a compressão foram moldados seis blocos para cada idade de ruptura (7, 14, 28, 60 e 90 dias) e proporção de agregado reciclado. Para isso, o procedimento de ensaio seguiu as recomendações propostas pela NBR 9780/1987, que determina que os blocos sejam capeados com pasta de enxofre (a temperatura de 130°C) na parte inferior e superior (Figura 4.6a e 4.6b), a fim de obter maior regularização

da superfície para realização do ensaio de resistência a compressão. Nesse ensaio utilizou-se a prensa hidráulica marca EMIC, modelo MUE-100 (Figura 4.6c), com capacidade de 20, 50 e 100 toneladas, localizada no laboratório de Construção Civil da Universidade Estadual de Maringá - UEM.



**Figura 4.6 – a) processo de capeamento, b) bloco capeado e c) Prensa hidráulica**

Em conformidade com o que descreve a NBR 9780/1987, para se obter a resistência a compressão da peça obtida (em MPa), divide-se a carga de ruptura (em N) pela área de carregamento ( $\text{mm}^2$ ), multiplicando-se o resultado por um fator “p” que é em função da altura da peça e está apresentado Tabela 4.4:

**Tabela 4.4: Fator multiplicativo da resistência obtida no ensaio de resistência a compressão de blocos para pavimentação**

| <b>Atura nominal da peça<br/>(mm)</b> | <b>Fator multiplicativo “p”</b> |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| 60                                    | 0,95                            |
| 80                                    | 1,00                            |
| 100                                   | 1,05                            |

### **4.3.5 Caracterização Química dos BCP com os resíduos de galvanoplastia**

#### ***4.3.5.1 Análise de lixiviação e Solubilização***

Monitorou-se os BCPs produzidos com os resíduos de galvanoplastia, utilizando as metodologias de lixiviação conforme a NBR 10005/2004 e solubilização conforme a NBR 1006/2004 a fim de observar a interação dos resíduos de galvanoplastia na matriz cimentícia, para todas as idades de cura (7, 14, 28, 60 e 90 dias).

### **4.3.6 Caracterização Microestrutural dos BCP com resíduos de galvanoplastia**

#### ***4.3.6.1 Microscopia Eletrônica de Varredura e Difração de Raios-X***

Foram coletadas amostras de superfície de fratura dos BCP (PJ e LG), rompidos nos ensaios de resistência à compressão com idade de 28 dias para submetê-las à análise de difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) na Central de Análises Avançadas de Materiais do Complexo de Centrais de Apoio a Pesquisa da Universidade Estadual de Maringá (CAM/COMCAP/UEM).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS NATURAIS E AGREGADOS ARTIFICIAIS

#### 5.1.1 Granulometria dos Agregados Naturais

Para a confecção dos blocos foram utilizados areia quartzosa (agregado miúdo), proveniente da bacia do Rio Ivaí/PR e brita zero de origem granítica (agregado graúdo), conhecida comercialmente como pedrisco.

Os ensaios da composição granulométrica do agregado miúdo (areia) e do agregado graúdo (pedrisco) são apresentados na Tabela 5.1. A curva granulométrica da areia está apresentada na Figura 5.1, em conjunto com os limites de distribuição granulométrica apresentados na NBR 7211/2009.

**Tabela 5.1 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo**

| Peneira<br>(mm)                                 | Areia    |                       | Pedrisco |                       |
|---|----------|-----------------------|----------|-----------------------|
|   | % Retido | % Retido<br>acumulado | % Retido | % Retido<br>acumulado |
| 9,5   | 0,00     | 0,00                  | 0,27     | 0,27                  |
| 6,3   | 0,00     | 0,00                  | 34,56    | 34,83                 |
| 4,8   | 0,00     | 0,00                  | 30,81    | 65,64                 |
| 2,4   | 0,12     | 0,12                  | 31,34    | 96,98                 |
| 1,2   | 1,17     | 1,29                  | 0,68     | 97,66                 |
| 0,6   | 5,74     | 7,03                  | 0,15     | 97,81                 |
| 0,3   | 59,09    | 66,12                 | 0,19     | 98,00                 |
| 0,15  | 32,40    | 98,52                 | 0,24     | 98,24                 |
| Fundos  | 1,48     | 100,00                | 1,76     | 100,00                |
| <b>Dimensão Máxima<br/>Característica (DMC)</b> |          | 2,4 mm                |          | 9,5 mm                |
| <b>Módulo de finura</b>                         |          | 1,73                  |          | 5,89                  |

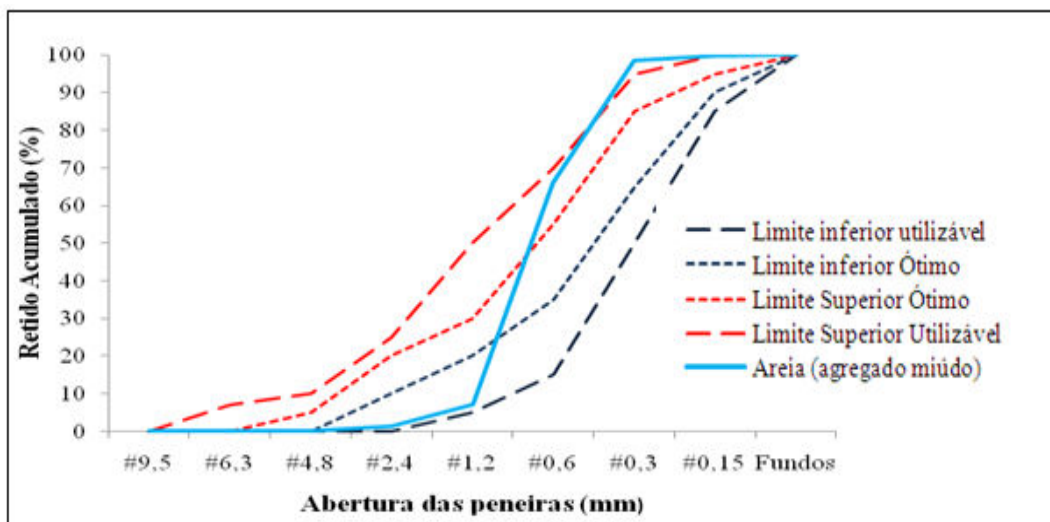


Figura 5.1 - Curva granulométrica do agregado miúdo (areia)

O agregado graúdo utilizado, para fins de moldagem dos BCP foi a brita “0”. Sua forma e granulometria devem garantir aumento de sua massa unitária e bom acabamento. Sua curva granulométrica estão apresentadas na Figura 5.2.

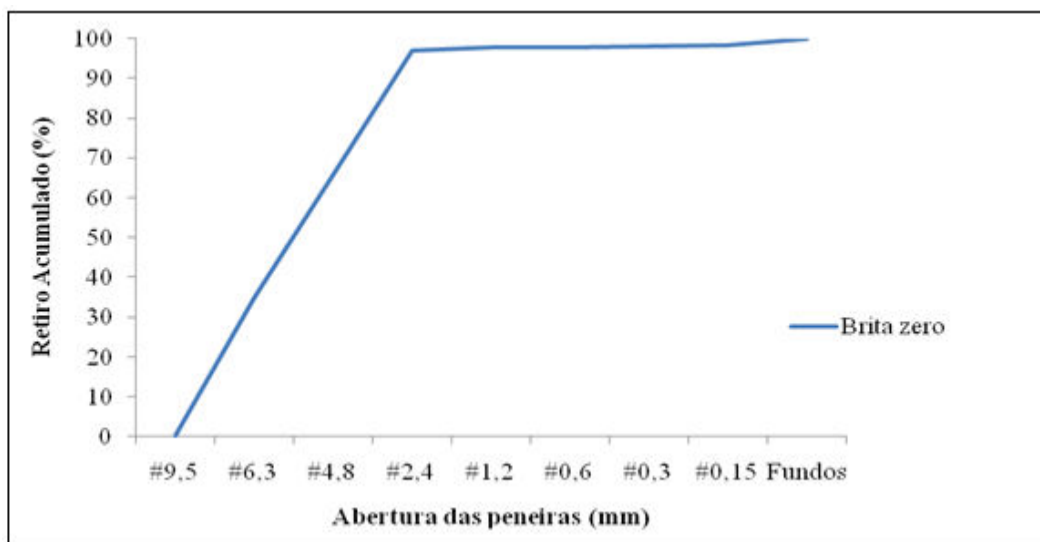


Figura 5.2 - Curva granulométrica da brita “0” ou pedrisco

A curva granulométrica do agregado miúdo (areia), utilizado nesse trabalho, apresentou faixa próxima a areia média, obtendo dimensão máxima característica (DMC) foi de 2,4 mm e módulo de finura (MF) de 1,73, valores aceitos segundo a norma e próximos aos encontrados para areia média por Pettermann (2006).



Já para o agregado graúdo (brita “0”), os valores apresentados para (DMC) de 9,5 mm e (MF) de 5,89. Estes valores ficaram próximos aos encontrados para agregado graúdo por Pagnussat (2004) com DMC de 9,5 e MF de 5,86 e Pettermann (2006) com DMC de 9,5 e MF de 5,56.

### 5.1.1.1 *Massa Específica e Massa Unitária dos Agregados Naturais*

A determinação da massa específica, definida como relação entre a massa e o volume de cheios, estabelecida na NBR NM 52/2003, é fator essencial na dosagem do concreto, pois, possibilita o cálculo do consumo de materiais utilizados na produção das misturas. Já a massa unitária, é definida na NBR 7251/1982, como a massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade de volume.

Os resultados das determinações dessas duas variáveis, para o agregados naturais estão apresentados na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2 - Massa Específica e Unitária dos agregados naturais**

| <b>Ensaio (kg.dm<sup>-3</sup>)</b> | <b>Agregado miúdo natural (areia)</b> | <b>Agregado graúdo natural (brita zero)</b> |
|------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Massa específica                   | 2,65                                  | 2,90  |
| Massa unitária solto               | 1,64                                  | 1,74  |
| Massa unitária compactado          | 2,11                                  | 1,84  |

Os valores de massa específica (ME) e massa unitária (MU), encontrados para o agregado miúdo e agregado graúdo, tiveram seus valores semelhantes aos encontrados por Pagnussat (2004) e Pettermann (2006), que utilizaram estes agregados para a mesma finalidade que este trabalho.

### 5.1.2 **Granulometria dos Resíduos de Galvanoplastia**

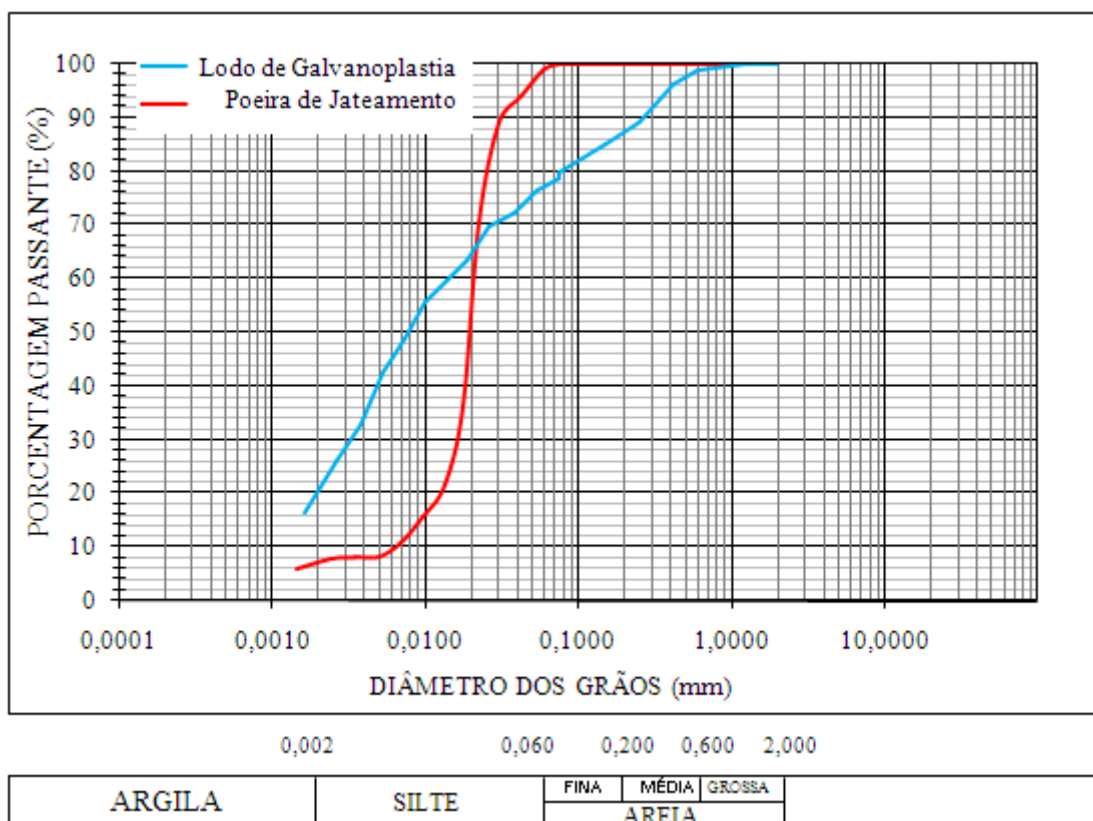
A granulometria é uma característica intimamente ligada à propriedade aglomerante do cimento, pois influi decisivamente na reatividade e na velocidade das reações químicas que se processam durante a pega e o endurecimento. No presente trabalho, foi utilizado como agregado miúdo os resíduos de galvanoplastia, cuja distribuição granulométrica seguiu a

NBR 7181/1984 e NBR 6508/1984. Os resultados da avaliação granulométrica desses materiais encontram-se na Tabela 5.3 e Figura 5.3.

**Tabela 5.3- Composição granulométrica dos resíduos de galvanoplastia**

| Peneira (mm)                             | Porcentagem Passante (%) |                        |
|--|--------------------------|------------------------|
|  | Poeira de Jateamento     | Lodo de Galvanoplastia |
| 2,000                                    | 100,0                    | 100,0                  |
| 1,200                                    | 100,0                    | 100,0                  |
| 0,600                                    | 100,0                    | 99,0                   |
| 0,420                                    | 100,0                    | 96,2                   |
| 0,250                                    | 100,0                    | 89,4                   |
| 0,150                                    | 100,0                    | 85,0                   |
| 0,075                                    | 99,9                     | 79,7                   |
| 0,059                                    | 98,8                     | 78,9                   |
| 0,042                                    | 94,1                     | 76,3                   |
| 0,030                                    | 89,3                     | 72,5                   |
| 0,022                                    | 70,4                     | 69,9                   |
| 0,017                                    | 36,1                     | 63,5                   |
| 0,013                                    | 21,8                     | 59,6                   |
| 0,010                                    | 15,8                     | 55,6                   |
| 0,007                                    | 11,0                     | 49,0                   |
| 0,005                                    | 8,3                      | 42,7                   |
| 0,003                                    | 8,1                      | 33,0                   |
| 0,002                                    | 8,0                      | 26,1                   |
| 0,001                                    | 6,1                      | 16,4                   |
| <b>Aspecto</b>                           | Pulverulento             | Pulverulento           |
| <b>pH</b>                                | 9,07                     | 3,5                    |
| <b>Densidade<br/>(g.cm<sup>-3</sup>)</b> | 2,61                     | 2,33                   |

As faixas granulométricas dos resíduos tem se mostrado como importante requisito para a reação da atividade pozolânica no concreto. A cinza da casca de arroz (CCA) e metacaulim são exemplos bem sucedidos na produção de concreto, comportando-se como reativos pozolânicos e tendo faixas granulométricas também nas faixas de silte, com diâmetro médio de 12µm ou 0,012 mm e 40 µm ou 0,04 mm, respectivamente (TASHIMA *et al.* 2004,. METHA e MONTEIRO, 1994; SANTOS e PRUDÊNCIO, 1998; LIMA e TOLEDO FILHO, 2008).



**Figura 5.3 - Curva granulométrica dos resíduos de galvanoplastia**

Os resultados de classificação granulométrica dos resíduos de galvanoplastia (poeira de jateamento e lodo de galvanoplastia), mostram que os mesmos encontraram-se entre as faixas finas, no limite das frações do silte (partículas entre 0,002 a 0,06 mm), caracterizando-os com agregado miúdo, podendo ser utilizados para essa finalidade em substituição ao cimento.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA

### 5.2.1 Determinação de Metais por meio de Digestão Nítrico-perclórica

A determinação da concentração de metais pesados fornece parâmetros quanto aos riscos potenciais do tipo de material em peso seco, se caso forem dispostos de maneira inadequada no solo, corpos d'água e em águas subterrâneas, avaliando o risco à saúde humana para cenários de exposição em área industrial.

Na tabela 5.4 são apresentadas as concentrações de elementos nos resíduos, após extração via digestão nítrico-perclórica.

**Tabela 5.4 – Concentração média e desvio-padrão dos ânions extraídos em digestão ácida**

| Parâmetros | Poeira de Jateamento<br>(mg.kg <sup>-1</sup> ) | Lodo de Galvanoplastia<br>(mg.kg <sup>-1</sup> ) | Interv.Solo Industrial<br>(mg.kg <sup>-1</sup> )* |
|------------|--|--|---|
| Alumínio   | 7,25 ± 0,7                                     | 10,67 ± 3,2                                      | -   |
| Arsênio    | 1,37 ± 0,1                                     | 1,46 ± 0,2                                       | 150   |
| Bário      | 1,46 ± 0,0                                     | 10,38 ± 4,2                                      | 750   |
| Cádmio     | 0,28 ± 0,0                                     | 0,03 ± 0,0                                       | 20  |
| Chumbo     | 2,46 ± 0,3                                     | 0,39 ± 0,4                                       | 900   |
| Cálcio     | 28,67 ± 2,7                                    | 8,66 ± 1,0                                       | -   |
| Cobre      | <b>234,10 ± 18,2</b>                           | 0,42 ± 0,0                                       | 600   |
| Cromo      | 8,51 ± 0,6                                     | 3,63 ± 1,4                                       | 400   |
| Ferro      | 64,53 ± 6,7                                    | <b>452,34 ± 44,8</b>                             | -   |
| Magnésio   | 184,23 ± 22,5                                  | 2,83 ± 0,4                                       | -   |
| Manganês   | 1,04 ± 0,1                                     | 0,96 ± 0,2                                       | -   |
| Níquel     | 4,34 ± 0,3                                     | 1,87 ± 0,3                                       | 130   |
| Selênio    | n.d  | 0,20 ± 0,0                                       | -   |
| Sódio      | 113,08 ± 13,7                                  | 167,61 ± 19,0                                    | -   |
| Zinco      | 48,39 ± 26,9                                   | 577,41 ± 61,3                                    | 2.000   |

\* Intervenção em Solo Industrial (mg.kg<sup>-1</sup> peso seco) - Área de Proteção Máxima (APMax) segundo CETESB DD 195 (2005).

Verifica-se que ambos os resíduos apresentaram teor de pelo menos um metal acima dos estabelecidos na legislação brasileira. O teor de cobre na poeira de jateamento foi de 234,1 mg.kg<sup>-1</sup>, para o lodo de galvanoplastia encontrou-se concentração de ferro de 452,3mg.kg<sup>-1</sup>. Os valores encontrados de metais pesados indicam que há possibilidade de alteração prejudicial à qualidade dos solos e principalmente a qualidade das águas subterrâneas pelos resíduos de galvanoplastia, quando depositados incorretamente e sem tratamento.

Na poeira de jateamento os valores de cobre, magnésio e sódio estão relacionados ao processo de limpeza das peças, que é feito na face interna das câmaras de jateamento. E no lodo de galvanoplastia, o teor de sódio e zinco está relacionado ao processo de banhos das peças. Já o ferro, é utilizado no tratamento hidrotérmico direto, que resulta em ferrita (C<sub>4</sub>AF) mal cristalizada e com baixa magnetização, todos estes componentes utilizados na atividade galvanotécnica.

### 5.2.2 Lixiviação e Solubilização

A lixiviação e a solubilização correspondem às operações unitárias que tem por objetivo separar certas substâncias contidas nos materiais por meio de lavagem ou percolação com

solventes, e determina ou avalia a estabilidade química dos resíduos, permitindo assim verificar o grau de imobilização de seus contaminantes.

As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam os teores de íons determinados nos extratos lixiviado e solubilizado, respectivamente, bem como os limites máximos permitidos nesses extratos pela NBR 1004/2004, que constam nos Anexos F e G da referida norma.

**Tabela 5.5- Concentração de ânions no extrato lixiviado dos resíduos de galvanoplastia e cimento Portland**

| Parâmetros | Concentração (mg.L <sup>-1</sup> ) |                           |                     | Limite máximo<br>NBR 10004/2004<br>(Anexo F) |
|------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------|--|
|            | Poeira de<br>Jateamento            | Lodo de<br>Galvanoplastia | Cimento CPV-<br>ARI |  |
| Arsênio    | 0,77                               | 0,57                      | <b>1,30</b>         | <b>1,00</b>                                  |
| Bário      | 4,65                               | 1,34                      | 25,58               | <b>70,00</b>                                 |
| Cádmio     | <b>0,70</b>                        | 0,01                      | 0,03                | <b>0,50</b>                                  |
| Chumbo     | 0,16                               | 0,20                      | 0,40                | <b>1,00</b>                                  |
| Cromo      | 0,01                               | 0,05                      | 0,19                | <b>5,00</b>                                  |
| Mercúrio   | n.d                                | n.d                       | n.d                 | <b>0,10</b>                                  |
| Fluoreto   | n.d                                | n.d                       | n.d                 | <b>150,00<sup>**)</sup></b>                  |
| Prata      | 0,01                               | n.d                       | 0,02                | <b>5,00<sup>*)</sup></b>                     |
| Selênio    | 0,04                               | 0,12                      | 0,87                | <b>1,00</b>                                  |

<sup>\*)</sup> Parâmetro e limite máximo no lixiviado extraídos da *USEPA - Environmental Protection Agency 40 CFR - Part 261 - 24 - "Toxicity Characteristics"*.

<sup>\*\*)</sup> Parâmetro e limite máximo no lixiviado mantido, extraído da versão anterior da ABNT NBR 10004/1987. n.d: valor não detectado pelo equipamento.

Como pode ser visto na Tabela 5.5 a concentração de todos os elementos do lodo de galvanoplastia se encontraram abaixo do limite do anexo F da NBR 10004/2004, classificando-o como resíduo classe II (não perigoso), sendo necessário o ensaio de solubilização, a fim de classificar na classe II A (não perigoso, não inerte) ou classe II B (não perigoso, inerte).

Verifica-se que para a poeira de jateamento, o cádmio foi o único metal com valores acima do limite máximo estabelecido pela NBR 10004/2004, obtendo o código de indentificação D007 e Chemical Abstrat Substance (CAS) 7440-43-9. Devendo então esse resíduo ser classificado como resíduo sólido classe I (perigoso).

Na amostra de cimento, o metal que se encontrou acima do valor limite do anexo F da NBR 10004/2004 foi o arsênio, que quando descartado deve ser classificado como resíduo

classe I (perigoso), obtendo o código de identificação D005 e Chemical Abstrat Substance (CAS) 7440-38-2.

Outro aspecto a ressaltar é referente à técnica do co-processamento utilizada na fabricação do cimento, que tem com objetivo utilizar resíduos químicos tóxicos como combustíveis nos fornos de síntese e como mistura junto ao clínquer no processo produtivo. No entanto os resíduos tóxicos são advindos de empresas de diversas naturezas tais como metalúrgicas, siderúrgicas e químicas, ou seja, técnica que pode trazer impactos negativos ao meio ambiente se realizada sem estudo prévio dos materiais.

**Tabela 5.6 – Concentração de ânions no extrato solubilizado dos resíduos de galvanoplastia e cimento**

| Parâmetros | Concentração (mg.L <sup>-1</sup> ) |                           |             | Limite máximo<br>NBR 10004/2004<br>(Anexo G) |
|------------|------------------------------------|---------------------------|-------------|--|
|            | Poeira de<br>Jateamento            | Lodo de<br>Galvanoplastia | Cimento CPV |  |
| Alumínio   | n.d                                | <b>62,55</b>              | 0,27        | <b>0,20</b>                                  |
| Arsênio    | 0,80                               | <b>0,87</b>               | 1,23        | <b>0,01</b>                                  |
| Bário      | 0,21                               | 1,41                      | 12,64       | <b>0,70</b>                                  |
| Cádmio     | n.d                                | n.d                       | 0,01        | <b>0,005</b>                                 |
| Chumbo     | 0,30                               | <b>0,44</b>               | 0,26        | <b>0,01</b>                                  |
| Cloreto    | 0,30                               | 245,75                    | 1,02        | <b>250,00</b>                                |
| Cobre      | 3,15                               | <b>8,03</b>               | 0,08        | <b>2,00</b>                                  |
| Cromo      | 0,02                               | <b>1,47</b>               | 0,44        | <b>0,05</b>                                  |
| Ferro      | 0,09                               | <b>1,87</b>               | 0,05        | <b>0,30</b>                                  |
| Fluoreto   | n.d                                | n.d                       | 0,95        | <b>1,50</b>                                  |
| Manganês   | 0,02                               | <b>1,85</b>               | 0,02        | <b>0,10</b>                                  |
| Mercúrio   | n.d                                | n.d                       | n.d         | <b>0,001</b>                                 |
| Nitrato    | 13,52                              | n.d                       | 1,15        | <b>10,00</b>                                 |
| Prata      | n.d                                | n.d                       | 0,03        | <b>0,05</b>                                  |
| Selênio    | 0,30                               | 0,74                      | 0,07        | <b>0,01</b>                                  |
| Sódio      | 249,10                             | <b>962,46</b>             | 103,09      | <b>200,00</b>                                |
| Sulfato    | 13,66                              | 62,75                     | n.d         | <b>250,0</b>                                 |
| Zinco      | 0,04                               | <b>1219,73</b>            | 0,13        | <b>5,00</b>                                  |

Para o lodo de galvanoplastia verificou-se que as concentrações de alumínio, arsênio, bário, chumbo, cobre, cromo, ferro, manganês, selênio, sódio e zinco, ficaram acima dos valores estabelecidos pelo anexo G da norma, devendo ser classificado também como resíduo classe II A (não perigoso, não inerte).

Milanez *et al.* (2005), por meio da análise de lixiviação e solubilização classificou também o lodo gerado na atividade galvanotécnica, segundo a norma, como sendo classe II A (não perigoso, não inerte).

Esses resultados mostram o grau de toxicidade desses resíduos, sendo então necessário que os mesmos passem por um tratamento especial antes de sua disposição ou ainda por processos de reutilização, desde que fiquem imobilizados e não lixiviem ou solubilizem, durante ou após sua vida útil.

### 5.2.3 Atividade Pozolânica

Segundo Raverdy *et al.* (1980), os materiais com potencial aglomerante ou potencial pozolânico, devem apresentar um consumo mínimo de 330 mg de CaO/g de amostra combinados com o cimento para obter concretos mais duráveis, daí a necessidade de se determinar essa variável.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos na determinação da atividade pozolânica, pelo método de Chapelle modificado.

**Tabela 5.7 – Medida quantitativa da Atividade Pozolânica (Método Chapelle Modificado)**

| <b>Material</b>        | <b>Atividade pozolânica à (90±5)°C (mg CaO/g amostra)</b> |
|------------------------|---|
| Poeira de Jateamento   | 201,0   |
| Lodo de Galvanoplastia | 233,0   |

Observa-se na Tabela 5.7 que a atividade pozolânica das amostras da poeira de jateamento e lodo de galvanoplastia ficaram abaixo do valor sugerido pelo autor.

No entanto, alguns autores (Perkins, 2007; Shi *et al.*, 2005; Shayan e Xu, 2006; Shao *et al.*, 2000 e Guilhermino, 2008), afirmam que reatividade da sílica de um material é designada como grau de pozolanicidade, que depende dentre outros fatores, da proporção dos silicatos, uma vez que a reatividade aumenta com a superfície específica do material, sendo maior, quanto menores forem as partículas que o compõem, aumentando por consequência a resistência à compressão junto a matriz cimentícia.

Ainda, Ismail e Al-Hashmi (2009), encontraram em seu trabalho que a atividade pozolânica dos resíduos de vidro foi superior ao mínimo de 75%, especificado por meio da norma ASTM C618/2003 para materiais pozolânicos, sugerindo que ao utilizar o pó de vidro em substituição a areia ocorre um aumento da resistência do concreto.

Shayan e Xu (2004); Shi *et al.* (2005) e Schwarz *et al.* (2008), constataram que 30% de pó de vidro, poderiam ser incorporados como agregado ou em substituição ao cimento no concreto, sem quaisquer efeitos prejudiciais em longo prazo, e recomendaram a utilização de pó de vidro e de agregação de vidro juntos na produção de concreto, afirmam também que este material pode chegar a uma atividade pozolânica maior do que as cinzas volantes, quando adicionados ao cimento em concretos após 90 dias de cura.

Outro dado relevante, apontado por Gava (1999) em seu estudo comparativo de diferentes métodos de avaliação da atividade pozolânica, é que nem sempre o desempenho real dos materiais está ligado diretamente à atividade pozolânica, uma vez que a sua determinação não considera uma série de fatores que influenciam na reação e que os métodos de seleção e classificação desses materiais em muitos casos são realizados de forma errônea, prejudicando suas potenciais finalidades.

Neste sentido, Swamy (1993) afirma que a avaliação da atividade pozolânica deve ocorrer de forma ampla, levando em consideração as características químicas, morfológicas e físicas do material, assim como a resistência mecânica dos produtos de reação da pozolana com a cal e com o cimento.

### **5.3 PROPRIEDADES MICROESTRUTURAIS DA DOS RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA**

#### **5.3.1 Fluorescência de Raios-X (FRX)**

Na Tabela 5.8 são apresentadas as propriedades dos resíduos de galvanoplastia (poeira de jateamento e lodo de galvanoplastia).



**Tabela 5.8 - Concentração (%) dos elementos avaliados por fluorescência de raios-X**

| Elementos                      | Poeira de Jateamento<br>(% massa) | Lodo de Galvanoplastia<br>(% massa) |
|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 47,21                             | 5,34                                |
| CaO                            | 17,39                             | 2,97                                |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,95                              | 25,46                               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,31                              | 1,08                                |
| K <sub>2</sub> O               | 3,30                              | -                                   |
| Cr                             | 0,96                              | 0,14                                |
| Zn                             | 2,86                              | 39,51                               |
| Ni                             | 0,27                              | 0,10                                |
| Na <sub>2</sub> O              | 4,69                              | -                                   |
| MgO                            | 7,71                              | -                                   |
| Cu                             | 9,03                              | -                                   |

A fluorescência de raios-x tem fundamental importância no que se refere à atividade pozolânica, pois, esclarece de forma quantitativa os valores dos minerais interferentes para tal finalidade.

De acordo com a NBR 12653/1992, os materiais pozolânicos podem ser classificados em três grupos, baseando-se no primeiro parâmetro (SiO<sub>2</sub>), na origem e na soma dos materiais SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> da porcentagem mínima são divididas em Classe N ou 70%; Classe C a 70% e Classe a 50% dos constituintes.

Observa-se que a poeira de jateamento, pode se comportar como material pozolânico, tendo em vista que a soma dos constituintes, cujo resultado encontrado foi de 64,31%. Para o lodo de galvanoplastia o valor da soma de todos os constituintes foi de 31,88%, não sendo, portanto, um material pozolânico, de acordo com a norma supracitada.

Os valores encontrados para sílica (SiO<sub>2</sub>), na poeira de jateamento estiveram próximos aos valores encontrados por Gobbo (2009) para metacaulinita, com 55% para SiO<sub>2</sub>, material considerado pozolana artificial.

### 5.3.2 Difração de Raios-X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

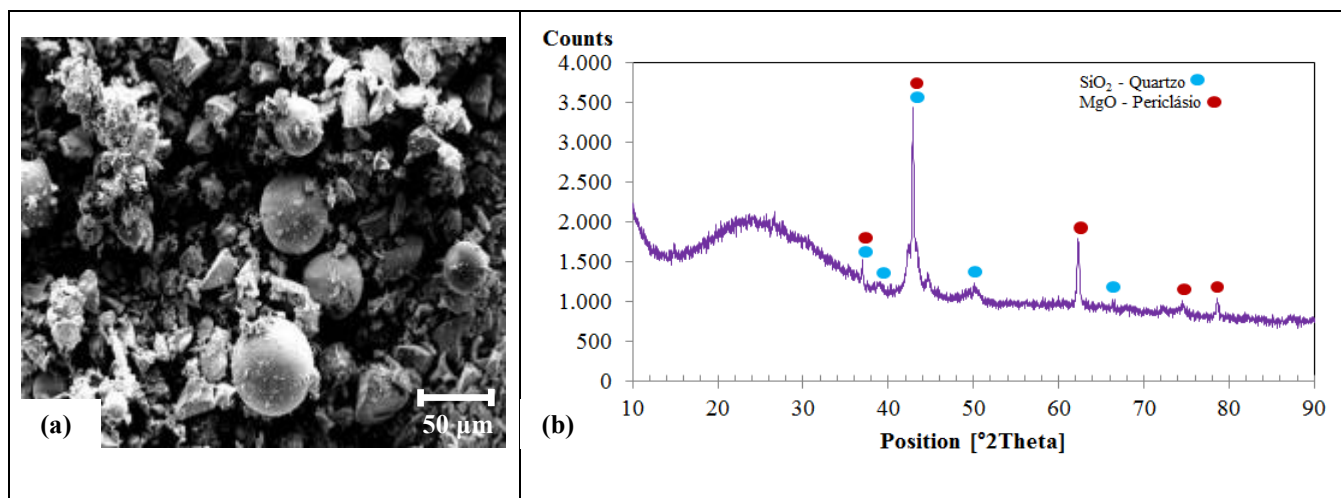
De acordo com Kihara e Zampieri (1988) e Rigo (1998) o microscópio eletrônico de varredura tem sido cada vez mais utilizado como instrumento de análise da microestrutura de pasta de cimento, argamassas e concretos. O seu grande poder de aumento (até 200.000 vezes) permite uma melhor avaliação e compreensão da microestrutura e composição de

materiais, das adições e substituições do cimento, do processo de hidratação e dos fatores que atuam na durabilidade de argamassas e concretos.

As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam as micrografias e os difratogramas de raios-X dos resíduos, bem como do cimento utilizados no presente trabalho.

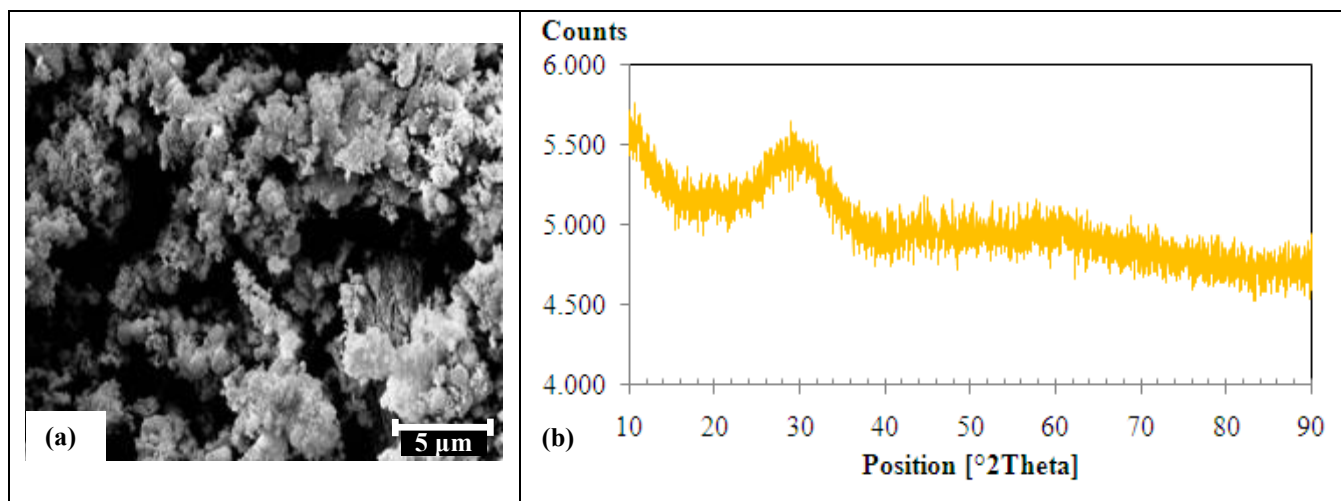
Segundo Montanheiro *et al.* (2003), a difração de raios-X é uma poderosa ferramenta para pré-qualificação da atividade pozolânica de um material e seus componentes destacam-se como uma banda amorfa do difratograma, no intervalo  $2\theta$ , entre  $18$  e  $32^\circ$ . Esta observação vai ao encontro dos resultados apresentados na Figura 5.4b, bem como para a poeira de jateamento estudada por Toledo (2006).

A micrografia da poeira de jateamento, Figura 5.4a, permite observar que esse material apresenta aspecto heterogêneo, formado por cavacos de vidro de formatos irregulares, provenientes dos choques gerados pela ação da limpeza da limpeza mecânica nas câmaras de jateamento.



**Figura 5.4 - a) Micrografia (aumento 200x) e b) difratograma da poeira de jateamento**

A micrografia da Figura 5.5a mostra que as partículas de lodo de galvanoplastia (estado seco) estão dispersas sem homogeneidade, provavelmente devido à diversidade de elementos presentes no material, que se comprovam na difração de raios-X (Figura 5.5b), devido à mistura de vários produtos que são utilizados no tratamento físico-químico no processo industrial, sua morfologia (fase cristalina) não pôde ser identificada.

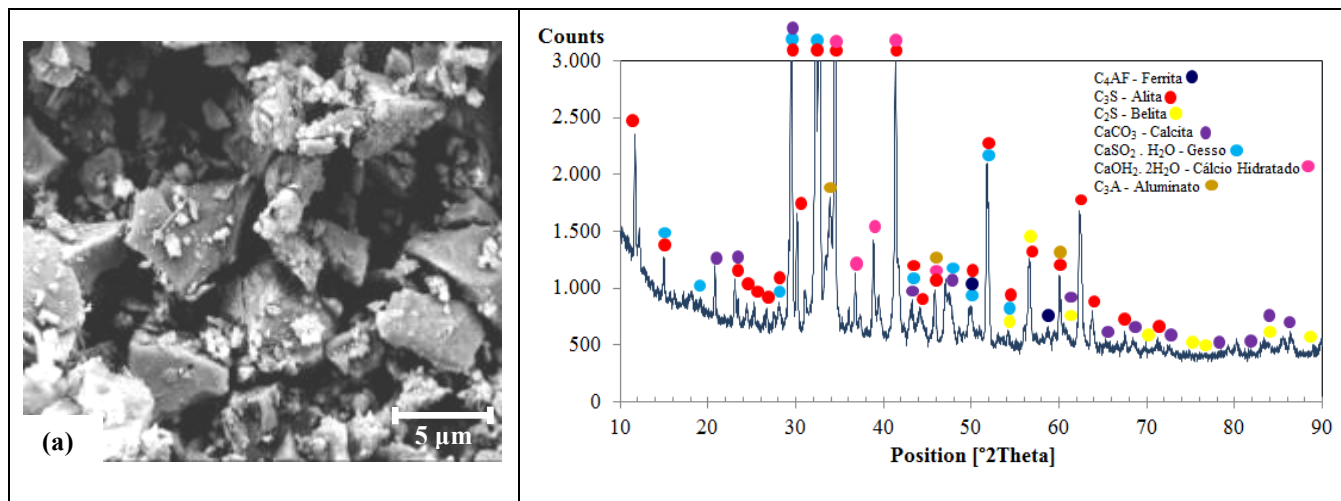


**Figura 5.5 - a) Micrografia (aumento 3000x) e b) difratograma do lodo de galvanoplastia**

Segundo Chen *et al.* (2010) o pico de maior intensidade, característico em lamelas galvânicas, está localizado na posição  $29^{\circ}2\theta$ , atribuído à calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), sem qualquer outro pico detectável de fase cristalina nas demais posições, passando a ser considerado como material amorfo, informação que pode ser observada também por meio da Figura 5.5b.

A micrografia obtida para o cimento (Figura 5.6a) permite observar a grande faixa de distribuição de tamanho de grãos do cimento, bem como a elevada finura do tipo de cimento utilizado, CPV - ARI, com ausência de partículas maiores que 50 μm.

Por meio do difratograma, Figura 5.6b, verifica-se que o cimento é constituído basicamente por silicato tricálcico ou alita ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  ou  $\text{C}_3\text{S}$ ), silicato dicálcico ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  ou  $\text{C}_2\text{S}$ ), responsáveis pela maioria das propriedades mecânicas, especialmente nos estágios iniciais de hidratação, além das estruturas cristalinas como: carbonato de cálcio ou calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), que pode ser produto da carbonatação do hidróxido de cálcio ou resíduo do processo de calcinação para a obtenção da cal livre, além de compostos como ferro-aluminato tetracálcico ou ferrita ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_4\text{AF}$ ), aluminato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_3\text{A}$ ), sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_3$ ) e cálcio hidratado ( $\text{CaOH}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).



**Figura 5.6 – a) Micrografia (aumento 3000x) e b) difratograma do cimento - CPV**

Para Alves (1976) e Souza e Ripper (1998) os constituintes principais do cimento Portland são, cal, sílica, alumina e óxido de ferro, cujos compostos principais são constituídos de silicatos tricálcico ( $C_3S$ ), silicatos dicálcico ( $C_2S$ ), aluminatos tricálcico ( $C_3A$ ), ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) e gipsita ( $C_5H_2$ ). Sendo que as proporções dos constituintes cristalinos do cimento Portland vão influenciar nas suas propriedades como resistência a compressão, calor de hidratação, resistência química, permeabilidade, porosidade etc.

No estudo de cimentos artificiais (clínqueres, calcários, fosfogesso, cinzas volantes e escórias de alto forno), realizado por Gobbo (2009), foi verificada a presença de cristais de belita e alita, associada aos teores de cal livre nas amostras dos cimentos avaliados.

#### **5.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DOS BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO (BCP)**

Esta fase se deu pela incorporação da poeira de jateamento e do lodo de galvanoplastia, separadamente, em substituição ao cimento na matriz cimentícia, na produção dos blocos de concreto para pavimentação (BCP) também conhecidos comercialmente por “Pavers”, dessa forma, todas as análises a seguir foram realizadas com os blocos ou fragmentos destes.

## 5.4.1 Caracterização Física

### 5.4.1.1 Ensaio de Absorção de Água (AA) dos BCP-PJ

A Tabela 5.9 e a Figura 5.7 apresentam os valores de absorção de água dos blocos moldados com diferentes substituições do cimento pela poeira de jateamento, bem como aqueles obtidos com os blocos de referência, realizados de acordo com a NBR 12118/2010.

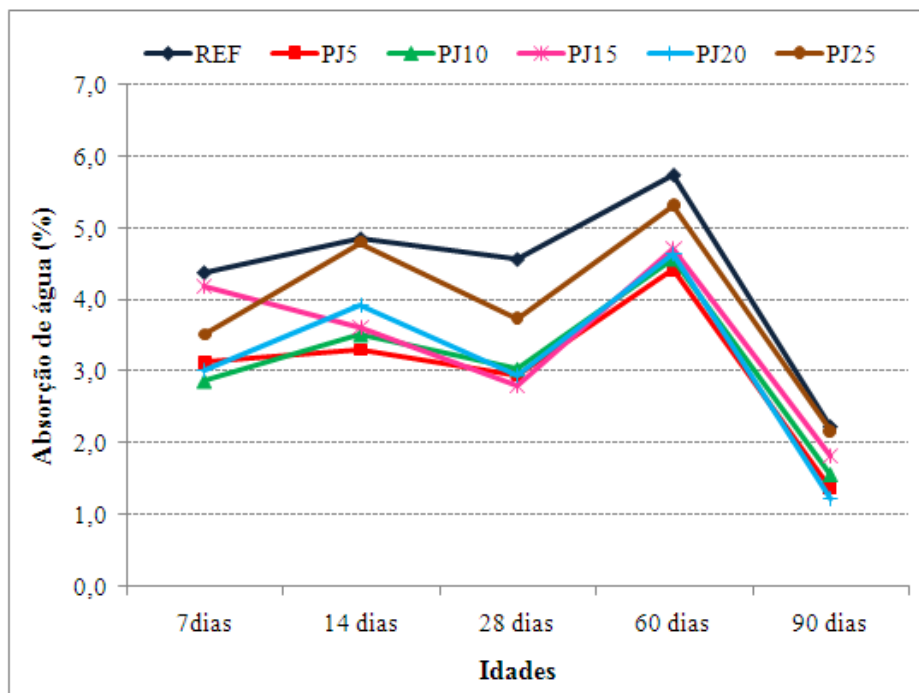
As Tabelas que apresentam todos os dados de absorção de água para cada BCP produzido, em todos os traços utilizados e idades de cura, encontram-se no apêndice 2.

**Tabela 5.9 - Média (%) dos resultados da absorção dos BCP-PJ após imersão em água**

| BCP  | 7 dias   |          |       | 14 dias  |          |       | 28 dias  |          |       | 60 dias  |          |       | 90 dias  |          |       |
|------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|
|      | Abs. (%) | $\sigma$ | C.V   | Abs. (%) | $\sigma$ | C.V   | Abs. (%) | $\sigma$ | C.V   | Abs. (%) | $\sigma$ | C.V   | Abs. (%) | $\sigma$ | C.V   |
| REF  | 4,37     | 0,54     | 12,27 | 4,84     | 1,20     | 24,83 | 4,55     | 0,29     | 6,43  | 5,73     | 1,41     | 24,69 | 2,22     | 0,38     | 16,92 |
| PJ5  | 3,13     | 0,08     | 2,60  | 3,30     | 0,37     | 11,22 | 2,95     | 0,20     | 6,86  | 4,42     | 0,38     | 8,66  | 1,37     | 0,29     | 21,10 |
| PJ10 | 2,87     | 0,01     | 0,22  | 3,51     | 0,19     | 5,44  | 3,03     | 0,58     | 19,09 | 4,57     | 0,31     | 6,83  | 1,57     | 0,32     | 20,46 |
| PJ15 | 4,17     | 1,66     | 39,90 | 3,61     | 0,18     | 5,09  | 2,80     | 0,17     | 5,98  | 4,71     | 0,49     | 10,36 | 1,81     | 0,34     | 18,91 |
| PJ20 | 3,00     | 0,24     | 7,94  | 3,93     | 0,35     | 8,88  | 2,93     | 0,05     | 1,58  | 4,64     | 0,39     | 8,52  | 1,22     | 0,25     | 20,94 |
| PJ25 | 3,52     | 0,39     | 11,10 | 4,80     | 0,14     | 3,01  | 3,74     | 0,58     | 15,50 | 5,32     | 0,47     | 8,88  | 2,17     | 0,04     | 1,73  |

Abs.(%): Valor de absorção de água;  $\sigma$ : Desvio-padrão e C.V.: Coeficiente de variação

De acordo com Hood (2006) a absorção de água nos blocos de concreto é uma característica importante a ser considerada, pois, tem reflexo direto na qualidade do bloco produzido e na vida útil do bloco em condições de utilização, neste sentido, blocos que absorvam muita água, em geral, são menos resistentes, além de poderem lixiviar elementos químicos mais facilmente, podendo causar eflorescências que prejudiquem o aspecto do pavimento.



**Figura 5.7 – Efeito da taxa de absorção de água nos BCP-PJ e REF ao longo do tempo**

Verifica-se na Tabela 5.9 e na Figura 5.7 que de forma geral, todos os pavimentos com substituições do cimento pela poeira de jateamento, apresentaram valores de absorção de água inferiores àqueles dos corpos de prova referência.

Dessa forma, a diminuição acentuada na variação da absorção de água após os 90 dias, nos blocos fabricados com o resíduo pode representar a estabilização das reações químicas na matriz, bem como a possível diminuição nas chances de lixiviação dos metais presentes nos agregados utilizados.

#### **5.4.1.2 Ensaio de Absorção de Água (AA) dos BCP-LG**

A Tabela 5.10 e a Figura 5.8 apresentam os valores de absorção de água dos blocos moldados com diferentes substituições do cimento pelo lodo de galvanoplastia, bem como aqueles obtidos com os blocos de referência, realizados de acordo com a NBR 12118/2010.

As Tabelas que apresentam todos os dados de absorção de água para cada BCP produzido, em todos os traços utilizados e idades de cura, encontram-se no apêndice 3.

Tabela 5.10 - Média (%) dos resultados da absorção dos BCP-LG após imersão em água

| BCP  | 7 dias   |          |       | 14 dias  |          |       | 28 dias  |          |       | 60 dias  |          |       | 90 dias  |          |       |
|------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|
|      | Méd. (%) | $\sigma$ | C.V   | Méd. (%) | $\sigma$ | C.V   | Méd. (%) | $\sigma$ | C.V   | Méd. (%) | $\sigma$ | C.V   | Méd. (%) | $\sigma$ | C.V   |
| REF  | 4,37     | 0,54     | 12,27 | 4,84     | 1,20     | 24,83 | 4,55     | 0,29     | 6,43  | 5,73     | 1,41     | 24,69 | 2,22     | 0,38     | 16,92 |
| LG5  | 3,80     | 0,27     | 7,00  | 3,59     | 0,40     | 11,03 | 4,02     | 0,22     | 5,44  | 5,70     | 0,58     | 10,23 | 2,18     | 0,27     | 12,26 |
| LG10 | 6,13     | 4,87     | 79,42 | 6,81     | 4,95     | 72,72 | 8,39     | 1,70     | 20,30 | 8,51     | 5,26     | 61,83 | 1,79     | 0,45     | 24,93 |
| LG15 | 9,12     | 9,01     | 98,85 | 5,18     | 3,04     | 58,58 | 5,04     | 0,59     | 11,62 | 8,97     | 2,58     | 28,78 | 2,10     | 1,58     | 75,47 |
| LG20 | 4,74     | 0,31     | 6,62  | 5,41     | 0,55     | 10,22 | 5,27     | 0,59     | 11,23 | 7,60     | 0,68     | 8,89  | 3,81     | 0,62     | 16,20 |
| LG25 | 5,73     | 0,56     | 9,83  | 6,89     | 0,57     | 8,24  | 5,36     | 0,51     | 9,48  | 9,28     | 1,07     | 11,51 | 3,48     | 0,09     | 2,45  |

Abs.(%): Valor de absorção de água;  $\sigma$ : Desvio-padrão e C.V.: Coeficiente de variação

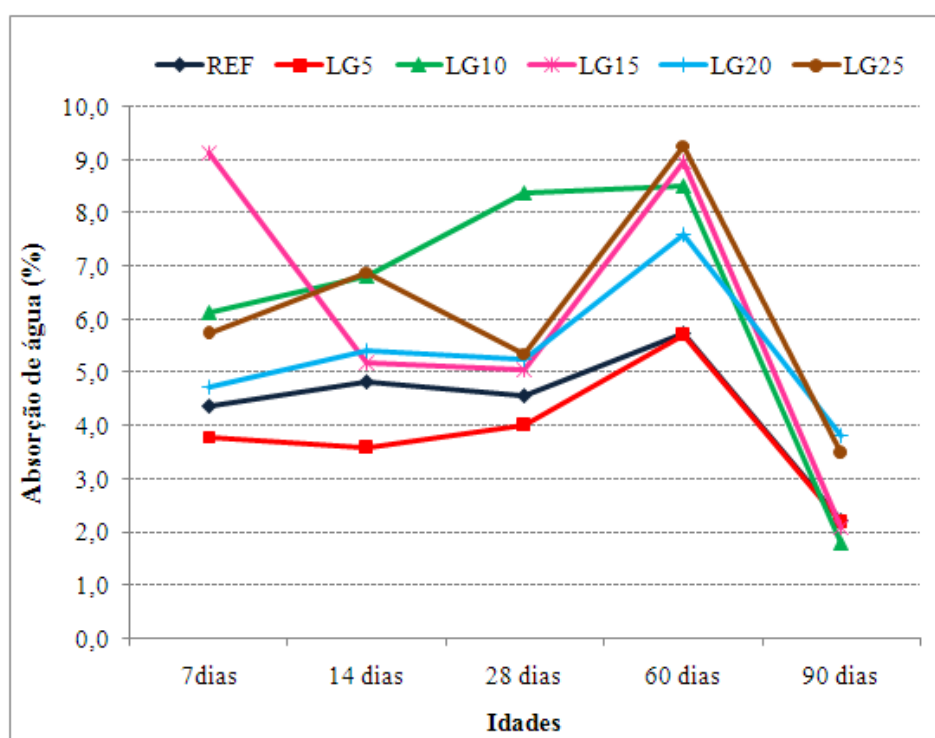


Figura 5.8 – Efeito da taxa de absorção de água nos BCP-LG e REF ao longo do tempo

O comportamento obtido de absorção de água para os BCP-LG foi bem diferente daquele verificado com os BCP-PJ. Verifica-se que apenas os BCP-LG5 apresentaram valores de absorção, em praticamente todas as idades de cura, menores que aquelas dos BCP-REF.

A maior absorção de água por parte dos BCP com porcentagem de lodo de galvanoplastia maior que 5%, pode de certa forma ser atribuída à relação água/aglomerante, exceção feita ao BCP-LG25, que apresenta relação água/aglomerante maior que a do BCP-REF. Outro fator que pode ter contribuído para esse comportamento é o aumento da quantidade de poros, à medida que aumenta a quantidade de resíduo na composição dos blocos.

Verifica-se também, que após os 60 dias de tempo de cura, houve uma diminuição acentuada no valor da absorção de água, que pode indicar uma influência da idade de cura na absorção de água e uma maior estabilidade dos pavimentos.

Tashima *et al.* (2004) em seu estudo da substituição de 10% de cimento por cinza da casca de arroz (CCA) em matriz cimentícia, verificou uma redução de até 27% na taxa de absorção de água, em relação ao traço referência aos 28 dias. Os autores relacionaram esse comportamento à granulometria muito fina do material.

É importante ressaltar que para todos os casos testados neste trabalho os valores da absorção de água foram inferiores aos estabelecidos na NBR 12118/2010, que é de 10%.

## **5.4.2 Caracterização Mecânica**

O desempenho mecânico dos BCP, avaliados por meio da resistência à compressão aos 28 dias de cura, como já mencionado, é de fundamental importância para a aceitação no mercado destes artefatos pré-moldados de concreto. A seguir são apresentados os resultados referentes a este ensaio.

### **5.4.2.1 Ensaio de Resistência à Compressão dos BCP-PJ**

As Tabelas com os dados de resistência à compressão para cada BCP produzido, em todos os traços utilizados e idades de rompimento, bem como a média, desvio-padrão, coeficiente de variação e porcentagem de resistência, comparado à média do rompimento realizado aos 28 dias dos corpos de prova referência (REF) se encontram no apêndice 4.

A Tabela 5.11 apresenta os resultados (média) dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de referência e dos produzidos por substituição do cimento pela poeira de jateamento entre 5 e 25%.



Tabela 5.11 – Médias de resistência à compressão dos BCP-PJ

| Traço       | a/agl | Resistência à compressão (MPa) |         |              |         |         |
|-------------|-------|--------------------------------|---------|--------------|---------|---------|
|             |       | 7 dias                         | 14 dias | 28 dias      | 60 dias | 90 dias |
| Sem subst.* | 0,40  | 27,77                          | 34,00   | <b>40,77</b> | 41,32   | 44,78   |
| 5           | 0,40  | 32,08                          | 41,85   | <b>42,60</b> | 45,78   | 46,83   |
| 10          | 0,40  | 28,72                          | 24,70   | <b>37,57</b> | 36,58   | 37,75   |
| 15          | 0,40  | 27,97                          | 28,43   | <b>35,60</b> | 35,90   | 39,60   |
| 20          | 0,40  | 20,77                          | 20,02   | 34,22        | 30,83   | 28,82   |
| 25          | 0,40  | 24,98                          | 21,10   | 27,90        | 28,10   | 37,70   |

\*Sem substituição ou REF.

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam os valores obtidos de resistência à compressão dos blocos, em função das idades de cura e das substituições do cimento pela poeira de jateamento, em comparação com os blocos referência (REF).

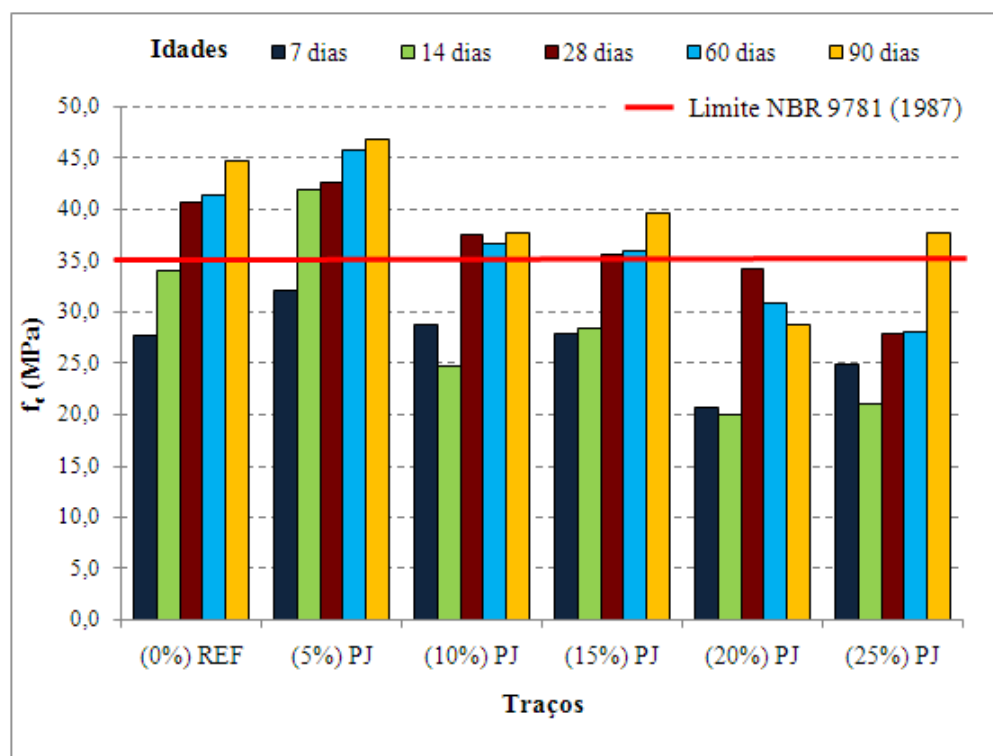


Figura 5.9 – Média de resistência à compressão dos BCP-PJ em todas as idades e substituições

Para os blocos de referência notou-se uma influência da idade de cura sobre o valor de resistência a compressão, chegando-se a uma resistência de 40,77 Mpa, aos 28 dias, ultrapassando o valor da NBR 9781/1987, para veículos leves.

Para os BCP fabricados com 5% de poeira de jateamento, em substituição ao cimento o mesmo comportamento foi observado, porém, nesse caso já aos 14 dias a resistência à compressão havia ultrapassado os 35 Mpa, chegando a 42,6 Mpa aos 28 dias, correspondendo a um aumento de 4,49% em relação ao BCP-REF, no mesma idade de cura. Nos pavimentos com 10% de poeira de jateamento em substituição ao cimento, observou-se um comportamento irregular, que caracterizou-se por uma queda na resistência aos 14 dias, aumentando porém aos 28 dias chegando-se a uma resistência de 37,57 MPa.

Para os BCP-PJ15 ocorreu diminuição na resistência em todas as idades de rompimento, comparada ao BCP-REF, porém, os valores das resistências aos 28, 60 e 90 dias respeitaram o limite de 35 MPa. Nos BCP-PJ20 houve um decréscimo acentuado das resistências permanecendo com todos os resultados abaixo do limite da norma. Nos pavimentos com 25% de substituição, somente aos 90 dias (37,70 MPa) a resistência manteve-se acima da norma, no entanto, inferior a resistência do BCP REF (44,78 MPa), para a mesma idade de cura.

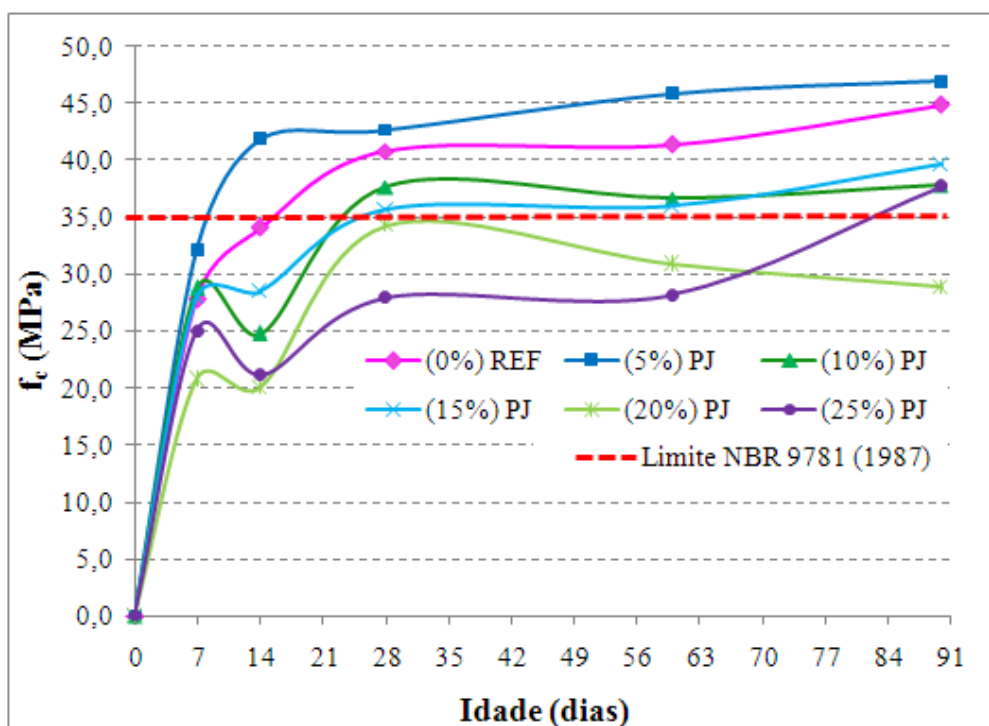


Figura 5.10 - Evolução da resistência à compressão de BCP-PJ ao longo do tempo

Fazendo uma comparação entre a evolução da resistência à compressão para os blocos fabricados com poeira de jateamento, em todas proporções testadas, verifica-se que aquele que apresentou maior resistência à compressão, em todas as idades de cura, foi o BCP-PJ5, ou seja aquele com substituição de 5% de cimento. Estes resultados apontam para uma potencial viabilidade ambiental e econômica da fabricação desse pavimento, nesse traço

Pode-se verificar ainda, que os BCP-PJ10 e BCP-PJ15, também apresentaram resistência à compressão, aos 28 dias de idade de cura acima dos 35,0 Mpa, o que também pode indicar a sua utilização para áreas de tráfego de veículos comerciais de linha, como preconiza a NBR 9781/1987.

Os resultados encontrados no presente trabalho, para o BCP-PJ5, foram bastante semelhantes àqueles encontrados por Petterman (2006), que trabalhou com resíduos considerados superpozolanas, o metacaulim (MC) e a sílica ativa (SA), em substituição a 10% de cimento na produção de BCP. O autor obteve resistência à compressão de 40 Mpa, para os blocos fabricados com sílica ativa, cerca de 6,3% superior ao valor da resistência à compressão de seus blocos referência, cujo valor obtido foi de 34 Mpa, aos 28 dias de cura.

#### **5.4.2.2    *Ensaio de Resistência à Compressão dos BCP-LG***

A Tabela 5.12 apresenta os resultados (média) dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de referência e dos produzidos por substituição do cimento por lodo de galvanoplastia entre 5 e 25%.

As Tabelas que apresentam todos os dados de resistência à compressão para cada BCP produzido, em todos os traços utilizados e idades de rompimento, além da média, desvio padrão, coeficiente de variância e porcentagem de resistência, comparado à média do rompimento realizado aos 28 dias dos corpos de prova referência (REF) se encontram no apêndice 5.

Tabela 5.12 – Médias de resistência à compressão dos BCP-LG

| Traço       | a/agl | Resistência à compressão (MPa) |         |              |         |         |
|-------------|-------|--------------------------------|---------|--------------|---------|---------|
|             |       | 7 dias                         | 14 dias | 28 dias      | 60 dias | 90 dias |
| Sem subst.* | 0,40  | 32,93                          | 36,95   | <b>37,35</b> | 39,52   | 37,45   |
| 5           | 0,35  | 27,88                          | 35,98   | <b>35,43</b> | 33,33   | 33,30   |
| 10          | 0,32  | 26,00                          | 23,38   | 26,77        | 30,53   | 19,80   |
| 15          | 0,37  | 22,70                          | 23,33   | 20,70        | 23,67   | 28,73   |
| 20          | 0,35  | 16,08                          | 22,82   | 22,23        | 20,50   | 23,55   |
| 25          | 0,42  | 15,63                          | 20,65   | 23,37        | 26,35   | 18,50   |

\*Sem substituição ou REF.

As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam os valores obtidos de resistência à compressão desses blocos, ao longo das idades de cura e das substituições do cimento pelo lodo de galvanoplastia, em comparação com os blocos referência (REF).

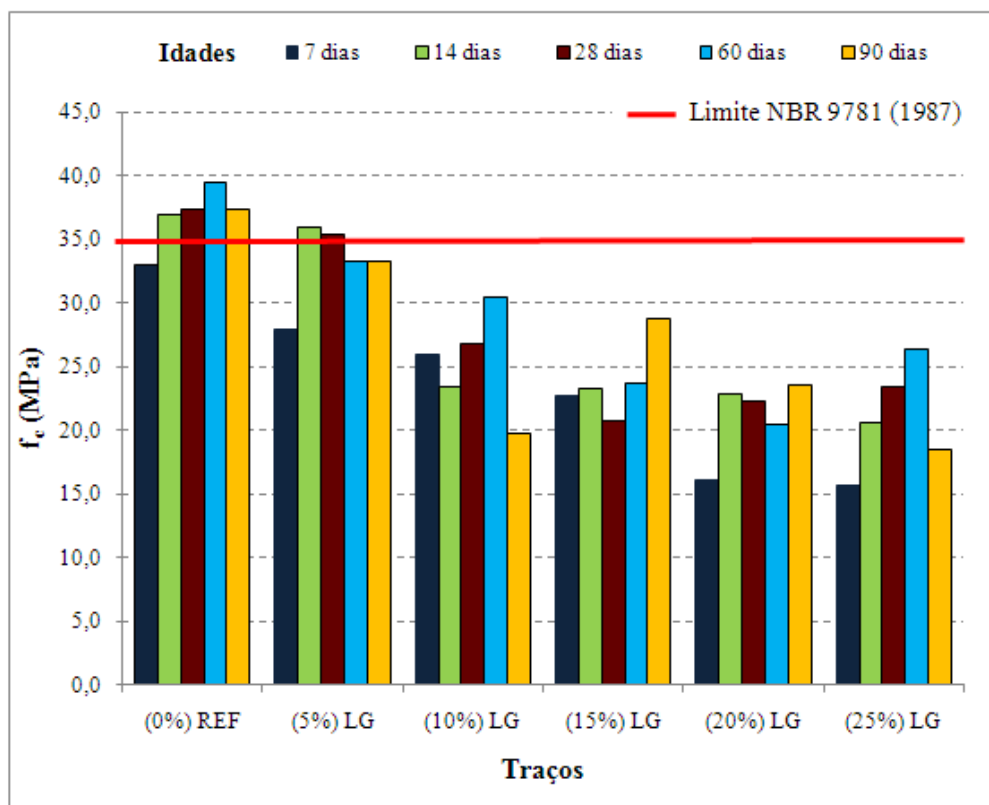


Figura 5.11 – Média de resistência à compressão dos BCP-LG em todas as idades e substituições

Verifica-se nas Figuras 5.11 e 5.12 que, ao contrário do obtido para os BCP-PJ, em nenhuma idade de cura e em nenhuma porcentagem de substituição, foi alcançado para os

BCP-LG, valores de resistência à compressão superiores àquelas alcançadas com os blocos referência.

Verifica-se ainda, que em todos os traços testados, aquele alcançou melhores resultados quanto a resistência a compressão foram os BCP-LG5, cujos blocos alcançaram resistência superior aos 35,0 Mpa aos 28 dias, assim como os resultados satisfatórios com relação à absorção de água e promissores quanto a viabilidade técnica da produção nesta proporção.

Esse comportamento pode estar relacionado à relação água/aglomerante, que nesse caso foi ligeiramente inferior àquela encontrada quando da fabricação dos BCP-PJ, bem como da própria interação entre a matriz cimentícia e o agregado (lodo de galvanoplastia).

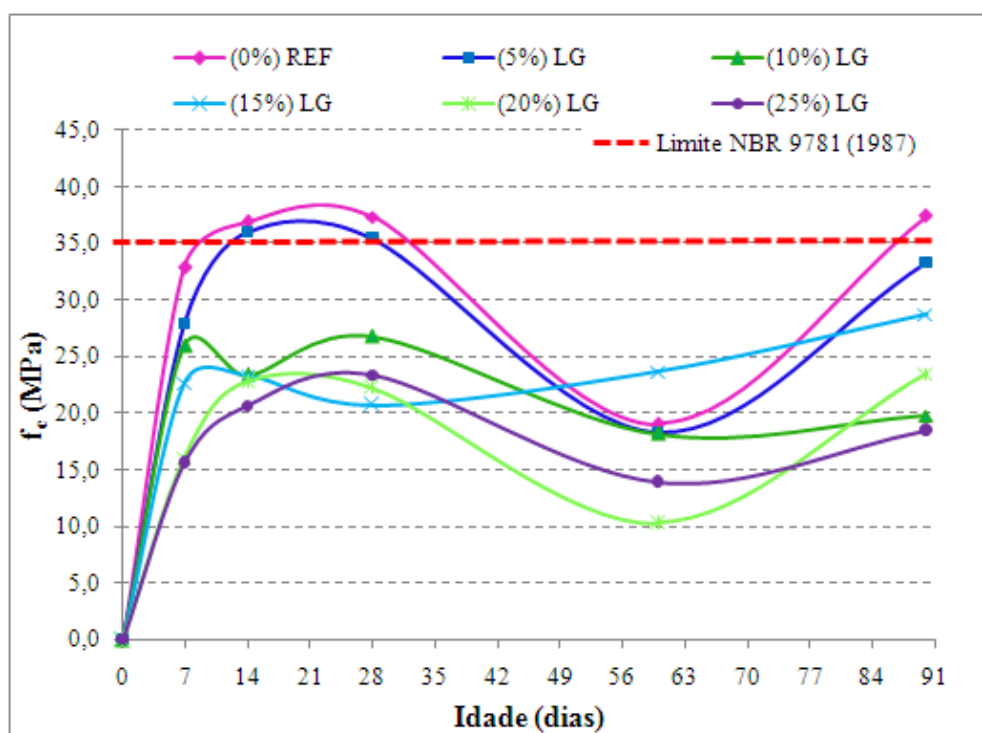


Figura 5.12 - Evolução da resistência à compressão de BCP-LG ao longo do tempo

Pode-se observar na Figura 5.13 uma ilustração do comportamento dos BCP-LG20 e BCP-LG25, que pode corroborar a afirmação da pouca interação matriz/aglomerante, tanto no estado fresco, como quando já endurecido. Verificou-se a formação de grãos de cor laranja no concreto, que atribui-se à relação água/aglomerante, ou ainda alguma reação indesejada que não permitiu uma maior interação.



Figura 5.13 - Aspecto da interação BCP-LG25

### 5.4.3 Caracterização Química

#### 5.4.3.1 Análise de lixiviação e solubilização das amostras de BCP-PJ

Nas Tabelas 5.13 e 5.14 são apresentadas os resultados das análises para a detecção de metais, nos extratos lixiviados e solubilizados, das amostras de pavimentos produzidos com a poeira de jateamento, bem como do bloco de referência, sem adição de resíduo, referente aos 28 dias de cura. As demais Tabelas referentes às outras idades se encontram no apêndice 6 e 7. São apresentados também nessa Tabela os valores constantes do Anexo F da NBR 10004/2004.

Tabela 5.13 – Ânions presentes no extrato lixiviado dos BCP-PJ (28 dias)

| Parâmetros (mg.L <sup>-1</sup> ) | REF  | PJ5  | PJ10 | PJ15 | PJ20 | PJ25 | Anexo F (NBR 10004/2004) |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|--------------------------|
| Arsênio                          | 1,11 | 1,03 | 1,10 | 0,92 | 1,19 | 1,09 | 1,00                     |
| Bário                            | 5,77 | 7,07 | 7,28 | 6,30 | 8,23 | 5,96 | 70,00                    |
| Cádmio                           | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,50                     |
| Chumbo                           | 0,33 | 0,35 | 0,33 | 0,32 | 0,31 | 0,34 | 1,00                     |
| Cromo Total                      | 0,23 | 0,16 | 0,17 | 0,14 | 0,11 | 0,49 | 5,00                     |
| Mercúrio                         | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,10                     |
| Prata                            | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 5,00 <sup>*)</sup>       |
| Selênio                          | 0,91 | 0,73 | 0,70 | 0,85 | 0,84 | 0,76 | 1,00                     |

<sup>\*)</sup> Parâmetro e limite máximo no lixiviado extraídos da USEPA - Environmental Protection Agency 40 CFR - Part 261 - 24 - "Toxicity Characteristics". n.d: valor não detectado pelo aparelho.

Verifica-se que, o lixiviado do corpo de prova padrão ou referência (REF), apresentou valor de concentração de arsênio ( $1,11 \text{ mg.L}^{-1}$ ) acima do limite estabelecido na NBR 10004/2004, isto significa que o resíduo gerado a partir de um material fabricado com essa formulação deve ser classificado como resíduo sólido classe I (perigoso).

Os valores de concentração de arsênio nos extratos lixiviados de BCP produzido com poeira de jateamento, com exceção daqueles produzidos com 15% de poeira de jateamento, também ficaram acima daquelas concentrações estabelecidas na norma brasileira, PJ5 ( $1,03 \text{ mg.L}^{-1}$ ), PJ10 ( $1,10 \text{ mg.L}^{-1}$ ), PJ20 ( $1,19 \text{ mg.L}^{-1}$ ) e PJ25 ( $1,09 \text{ mg.L}^{-1}$ ), o que também permite sua classificação, após seu tempo de uso como resíduo classe I (perigoso).

Um fator importante a destacar é que, muito provavelmente, essa quantidade de arsênio encontrada nesses extratos lixiviados, está relacionada à quantidade desse metal determinada no cimento, conforme pode ser verificado nos resultados apresentados no item 5.2.2.

O extrato lixiviado da amostra PJ15 apresentou concentração de arsênio de  $0,92 \text{ mg.L}^{-1}$ , valor abaixo do limite máximo estabelecido na NBR 10004/2004, neste caso, deve-se fazer o ensaio de solubilização, cujos resultados encontram-se na Tabela 5.14, para classificação do resíduo gerado a partir de um material com essa formulação, em classe II A (não perigoso, não inerte) ou classe II B (não perigoso, inerte).

**Tabela 5.14 – Ânions presentes no extrato solubilizado dos BCP-PJ (28 dias)**

| <b>Parâmetros</b> | <b>REF</b> | <b>PJ5</b> | <b>PJ10</b> | <b>PJ15</b> | <b>PJ20</b> | <b>PJ25</b> | <b>Anexo G (NBR 10004/2004)</b> |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------------|
| Alumínio          | 0,14       | 0,18       | 0,20        | 0,16        | 0,23        | 0,17        | <b>0,20</b>                     |
| Arsênio           | 0,83       | 0,88       | 0,65        | <b>0,83</b> | 0,85        | 0,98        | <b>0,01</b>                     |
| Bário             | 9,53       | 7,61       | 8,50        | <b>9,00</b> | 8,88        | 7,50        | <b>0,70</b>                     |
| Cádmio            | 0,01       | 0,01       | 0,01        | <b>0,01</b> | 0,01        | 0,01        | <b>0,005</b>                    |
| Chumbo            | 0,08       | 0,09       | 0,08        | <b>0,07</b> | 0,08        | 0,06        | <b>0,01</b>                     |
| Cobre             | 1,14       | 1,40       | 1,23        | 0,84        | 0,90        | 0,56        | <b>2,00</b>                     |
| Cromo total       | 0,02       | 0,02       | 0,01        | 0,02        | 0,02        | 0,01        | <b>0,05</b>                     |
| Ferro             | 0,04       | 0,03       | 0,02        | 0,03        | 0,03        | 0,01        | <b>0,30</b>                     |
| Manganês          | 0,01       | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,10</b>                     |
| Mercúrio          | n.d        | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>0,001</b>                    |
| Prata             | 0,01       | 0,03       | 0,04        | 0,03        | 0,03        | 0,02        | <b>0,05</b>                     |
| Selênio           | 1,39       | 1,17       | 1,34        | <b>1,16</b> | 1,30        | 1,12        | <b>0,01</b>                     |
| Sódio             | 54,52      | 55,22      | 47,80       | 48,42       | 46,41       | 38,90       | <b>200,00</b>                   |
| Zinco             | 0,04       | 0,04       | 0,04        | 0,03        | 0,03        | 0,03        | <b>5,00</b>                     |

Já para o ensaio de solubilização do PJ15, os valores dos metais arsênio, bário, cádmio, chumbo e selênio ultrapassaram os limites estabelecidos pelo anexo G da norma NBR 10004/2004, dessa forma os seus resíduos deverão ser classificados como resíduo classe II A (não perigoso, não inerte).

#### 5.4.3.2 *Análise de lixiviação e solubilização das amostras de BCP-LG*

Nas Tabelas 5.15 e 5.16 são apresentados os resultados das análises para a detecção de metais, nos extratos lixiviados e solubilizados, das amostras de pavimentos produzidos com o lodo de galvanoplastia, bem como do bloco de referência, sem adição de resíduo, referente aos 28 dias de cura.

**Tabela 5.15 – Ânions presentes no extrato lixiviado dos BCP-LG (28 dias)**

| Parâmetros  | REF   | LG5   | LG10  | LG15  | LG20        | LG25        | Anexo F (NBR 10004/2004) |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------------|--------------------------|
| Arsênio     | 0,80  | 0,95  | 0,97  | 0,96  | <b>1,08</b> | <b>1,08</b> | <b>1,00</b>              |
| Bário       | 45,34 | 50,50 | 49,60 | 51,35 | 51,32       | 51,49       | <b>70,00</b>             |
| Cádmio      | 0,03  | 0,04  | 0,03  | 0,03  | 0,03        | 0,03        | <b>0,50</b>              |
| Chumbo      | 0,29  | 0,30  | 0,29  | 0,30  | 0,28        | 0,28        | <b>1,00</b>              |
| Cromo Total | 0,25  | 0,25  | 0,24  | 0,28  | 0,28        | 0,30        | <b>5,00</b>              |
| Mercúrio    | n.d   | n.d   | n.d   | n.d   | n.d         | n.d         | <b>0,10</b>              |
| Prata       | 0,03  | 0,02  | 0,02  | 0,03  | 0,03        | 0,03        | <b>5,00<sup>*)</sup></b> |
| Selênio     | 0,27  | 0,28  | 0,29  | 0,29  | 0,22        | 0,22        | <b>1,00</b>              |

<sup>\*)</sup> Parâmetro e limite máximo no lixiviado extraídos da USEPA - *Environmental Protection Agency 40 CFR - Part 261 - 24 - "Toxicity Characteristics"*. n.d: valor não detectado pelo aparelho.

As concentrações de arsênio encontradas nas amostras dos pavimentos LG20 e LG25 foram superiores ao limite apresentado na norma, classificando o resíduo gerado a partir desses blocos como resíduo classe I (perigoso). Não sendo possível afirmar que a concentração desse metal tenha relação ao cimento utilizado, tendo em vista que o REF não apresentou esse metal em maior concentração.

Com relação aos blocos REF, LG5, LG10 e LG15, não foi verificado nenhum metal em concentração acima do limite da norma, também nesse caso há a necessidade de se realizar o ensaio de solubilização, para classificação do resíduo gerado a partir de um material com essas formulações, em classe II A (não perigoso, não inerte) ou classe II B (não perigoso inerte). Esses resultados encontram-se na Tabela 5.16.



Tabela 5.16 – Ânions presentes no extrato solubilizado dos BCP - LG (28 dias)

| Parâmetros  | REF         | LG5         | LG10        | LG15        | LG20  | LG25  | Anexo G (NBR 10004/2004) |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------|--------------------------|
| Alumínio    | 0,16        | <b>0,21</b> | 0,15        | <b>0,34</b> | 0,32  | 0,35  | <b>0,20</b>              |
| Arsênio     | <b>0,64</b> | <b>0,55</b> | <b>0,68</b> | 0,73        | 0,72  | 0,38  | <b>0,01</b>              |
| Bário       | <b>4,70</b> | <b>5,30</b> | <b>1,70</b> | <b>6,90</b> | 2,32  | 2,70  | <b>0,70</b>              |
| Cádmio      | <b>0,01</b> | <b>0,01</b> | <b>0,01</b> | <b>0,01</b> | 0,01  | 0,01  | <b>0,005</b>             |
| Chumbo      | <b>0,17</b> | <b>0,18</b> | <b>0,13</b> | <b>0,10</b> | 0,12  | 0,14  | <b>0,01</b>              |
| Cobre       | 0,08        | 0,08        | 0,12        | 0,09        | 0,08  | 0,07  | <b>2,00</b>              |
| Cromo total | 0,05        | 0,05        | 0,03        | 0,03        | 0,03  | 0,03  | <b>0,05</b>              |
| Ferro       | 0,08        | 0,04        | 0,03        | 0,04        | 0,04  | 0,05  | <b>0,30</b>              |
| Manganês    | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01  | 0,01  | <b>0,10</b>              |
| Mercurio    | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | n.d   | n.d   | <b>0,001</b>             |
| Prata       | 0,03        | 0,02        | 0,03        | 0,01        | 0,01  | 0,01  | <b>0,05</b>              |
| Selênio     | <b>0,86</b> | <b>0,90</b> | <b>0,53</b> | <b>0,62</b> | 0,52  | 0,70  | <b>0,01</b>              |
| Sódio       | 29,49       | 49,73       | 64,30       | 79,21       | 97,56 | 98,36 | <b>200,00</b>            |
| Zinco       | 0,03        | 0,03        | 0,08        | 0,04        | 0,03  | 0,08  | <b>5,00</b>              |

Verifica-se na Tabela 5.16 que uma boa parte dos metais presentes nos BCP-LG, foram solubilizados nos ensaios de solubilização, sendo detectados em concentrações acima daquelas estabelecidas na NBR 10005/2004, no entanto é muito importante ressaltar que esses valores podem ter sua origem no próprio cimento utilizado para a fabricação dos corpos de prova, uma vez que verifica-se que o bloco referência, ou seja, aquele fabricado sem a adição de resíduo, apresentou valores superiores ao estabelecido na norma. Assim como as características do lodo de galvanoplastia que foi coletado em forma de torrões, com grandes quantidade de materiais grosseiros e heterogêneos em sua composição.

O fato de já existir no cimento uma quantidade considerável dos metais solubilizados, deve ter levado a uma saturação da matriz cimentícia, o que provocou a dessorção dos metais para o extrato solubilizado. Dessa forma, deve-se buscar aglomerantes menos tóxicos para utilizar na fabricação desses blocos de pavimentação.

#### 5.4.3.3 *Evolução da concentração de metais no lixiviado das amostras de BCP-PJ e BCP-LG ao longo das idades de cura*

Ao acompanhar a evolução da concentração de metais no extrato lixiviado, tanto do BCP-PJ, quanto do BCP-LG, verificou-se que os metais arsênio e selênio, foram aqueles que

contribuíram de forma mais significativa para que os resíduos provenientes do BCP-PJ e do BCP-LG, devessem ser classificados na classe I (perigoso) ou classe II A (não perigoso, não inerte). As Figuras 5.14 e 5.15 apresentam a evolução da concentração desses metais nos extratos lixiviados das amostras de BCP-PJ e BCP-LG, respectivamente, ao longo do período de cura.

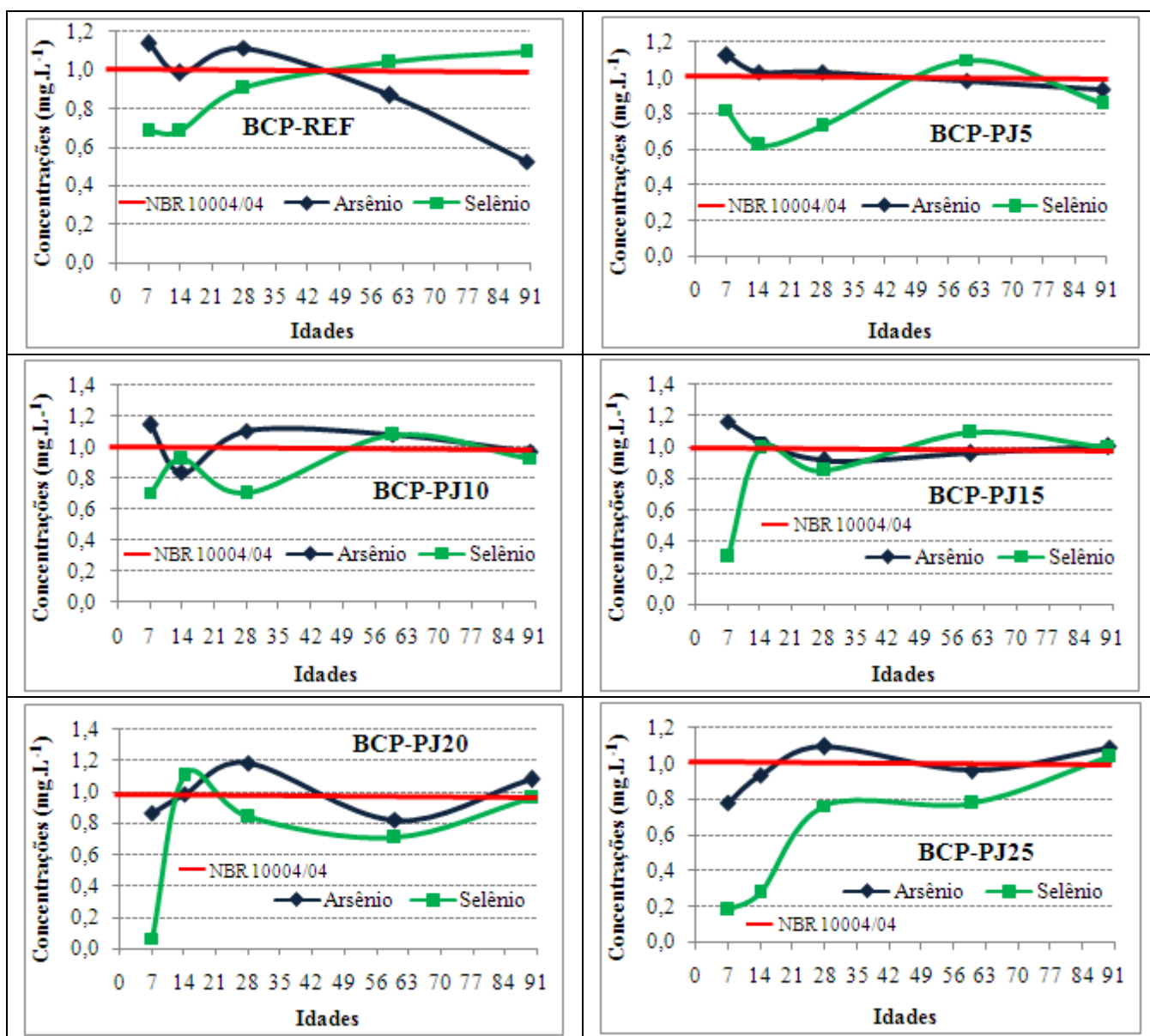


Figura 5.14 - Evolução da concentração de metais (As e Se) do lixiviado nos BCP-REF e BCP-PJ ao longo das idades de Cura

Analisando os resultados apresentados na Figura 5.14, verifica-se que houve variação na concentração de arsênio no extrato lixiviado dos BCP-PJ, ao longo do tempo de duração da

cura, que ora permitia sua classificação, após uso, como resíduo classe I (perigoso), ora como resíduo classe II (não perigoso), no entanto, houve uma tendência a diminuição da concentração para tempos de cura maiores. Há também oscilações nas concentrações de selênio, no entanto, de forma menos acentuada e em sua maioria, apresentando valores abaixo do valor máximo estabelecido na norma brasileira, acredita-se que esse comportamento está relacionado com a quantidade desse metal encontrado no extrato lixiviado do cimento, que ficou acima do valor estabelecido na norma, fato que pode ser corroborado pelos valores encontrados para lixiviação dos blocos referência.

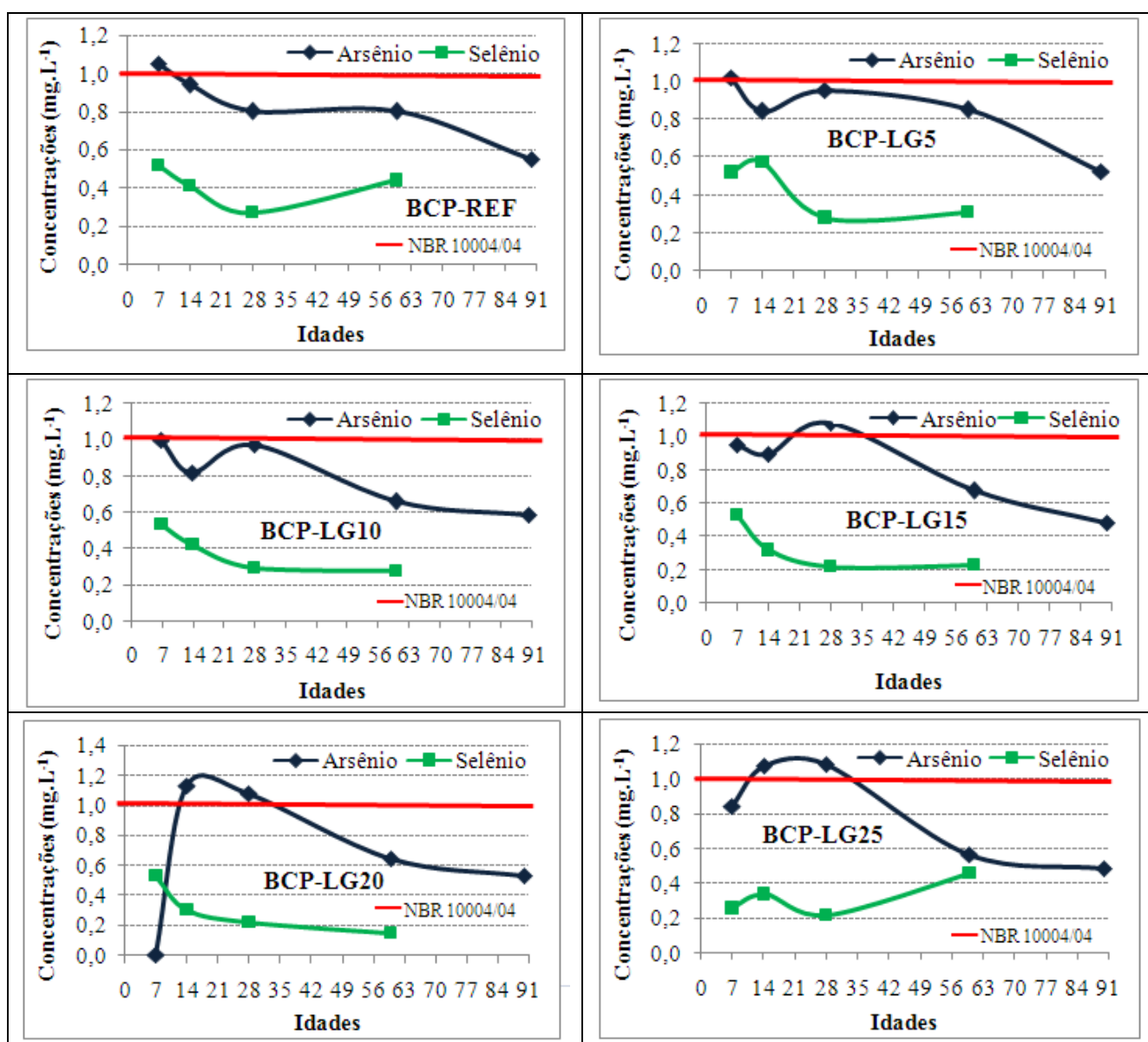


Figura 5.15 - Evolução da concentração de metais (As e Se) do lixiviado nos BCP-REF e BCP-LG ao longo das idades de Cura

Os valores de concentração de arsênio nos BCP utilizados como referência nos ensaios com o lodo de galvanoplastia foram diferentes daqueles determinados quando da utilização da poeira de jateamento. Esses resultados, muito provavelmente, são devidos a utilização de um cimento diferente daquele utilizado anteriormente, apesar de ter sido utilizado um cimento da mesma marca e mesmo fabricante. Apesar de não ter sido feito ensaio de lixiviação para esse novo lote de cimento, os resultados parecem indicar que o teor de metal desse lote era menor. Observa-se decréscimo da concentração de arsênio com o decorrer do tempo de cura, atingindo valores abaixo do estabelecido pela norma.

Verifica-se nos gráficos da Figura 5.15, que para o caso dos blocos BCP-LG, não houve lixiviação do selênio, apresentando concentrações abaixo daquela estabelecida na NBR 10004/2004, em todas as idades de cura e em todas as proporções de lodo, bem como no bloco referência. Os resultados apresentados permitem concluir que para que essa técnica possa ser considerada ambientalmente viável, há que se utilizar uma matriz cimentícia com menor concentração de metais perigosos. Além disso, esses resultados parecem apontar para uma associação dos dois tipos de resíduos, como forma de melhorar a interação matriz/resíduo.

#### 5.4.3.4 Potencial Hidrogeniônico (pH)

As Figuras 5.16 e 5.17 apresentam as variações do pH, ao longo das idades de cura, nos BCP produzidos com poeira de jateamento e com lodo de galvanoplastia, respectivamente.

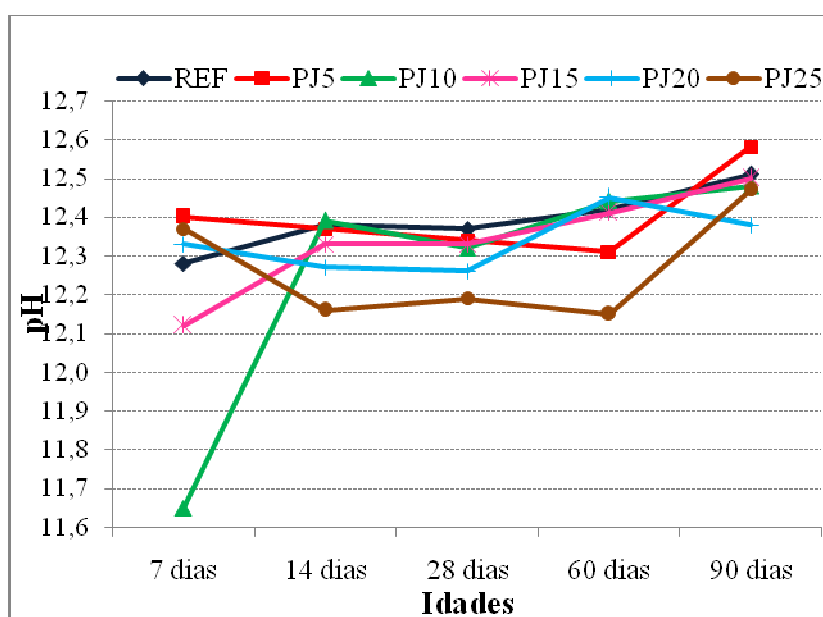


Figura 5.16 – Variação do pH em função das idades de cura para os BCP-PJ

Segundo Thomé (1999) o consumo de hidroxilas nas reações pozolânicas é variável no decorrer do processo de cura, sendo o maior consumo entre os 28 a 90 dias, sendo que após 120 dias de cura, o valor de pH praticamente não se altera, mantendo-se maior que 11.

Para Vieira (2005) a alta alcalinidade do concreto, é devida nas primeiras idades a presença do hidróxido de cálcio ( $\text{CaOH}_2$ ) oriundo das reações de hidratação do cimento e em idades mais avançadas aos hidróxidos de sódio e potássio provenientes dos álcalis do cimento. Deste modo, o pH das soluções intersticiais de concretos contendo pozolanas em substituição ao cimento Portland pode ser reduzido em consequência não apenas da reação pozolânica, que consome o  $\text{CaOH}_2$ , mas também devido a maior diluição do cimento, que reduz a oferta dos compostos provenientes dos seus álcalis. A autora conclui que o equilíbrio provocado pela lixiviação do hidróxido de cálcio ( $\text{CaOH}_2$ ) e dos álcalis do cimento, forçam o pH das soluções para os valores em torno de 12,5, devido ao aumento da substituição do cimento por material pozolânico.

O comportamento do pH das amostras de BCP fabricados com lodo de galvanoplastia foi semelhante ao dos BCP fabricados com poeira de jateamento, conforme pode ser visto na Figura 5.17.

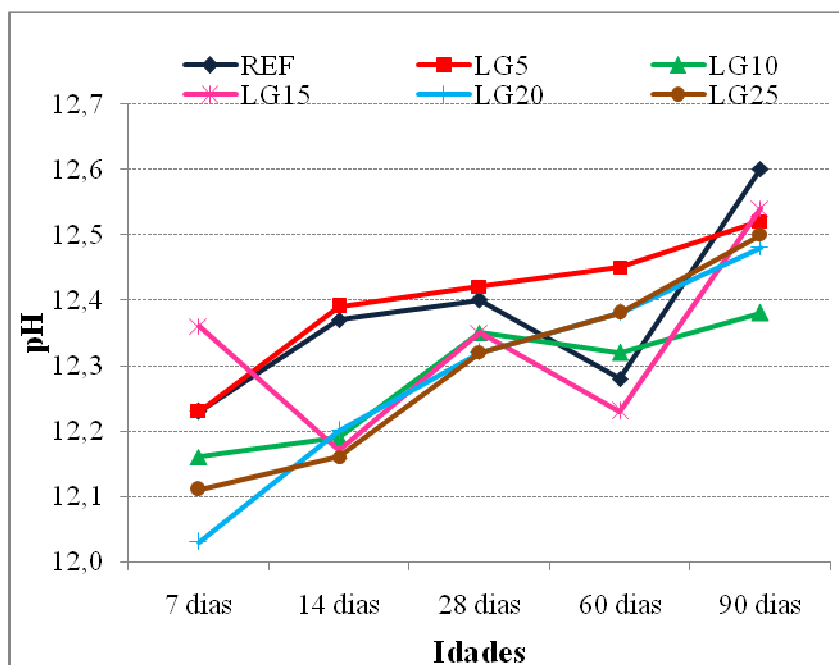


Figura 5.17 – Variação do pH em função dos idades de cura para os BCP-LG

Para ambos pavimentos, percebe-se que conforme aumentou-se as idades de cura o pH foi se estabilizando, chegando a valores entre 12,4 e 12,6 nos 90 dias de cura. Esse comportamento pode estar relacionado à tendência do pH se encontrar na faixa da alcalinidade, resultados semelhantes aos apresentados para matriz cimentícia com utilização de pozolanas e corroborados pelas afirmações de Vieira (2005).

#### **5.4.4 Caracterização Microestrutural**

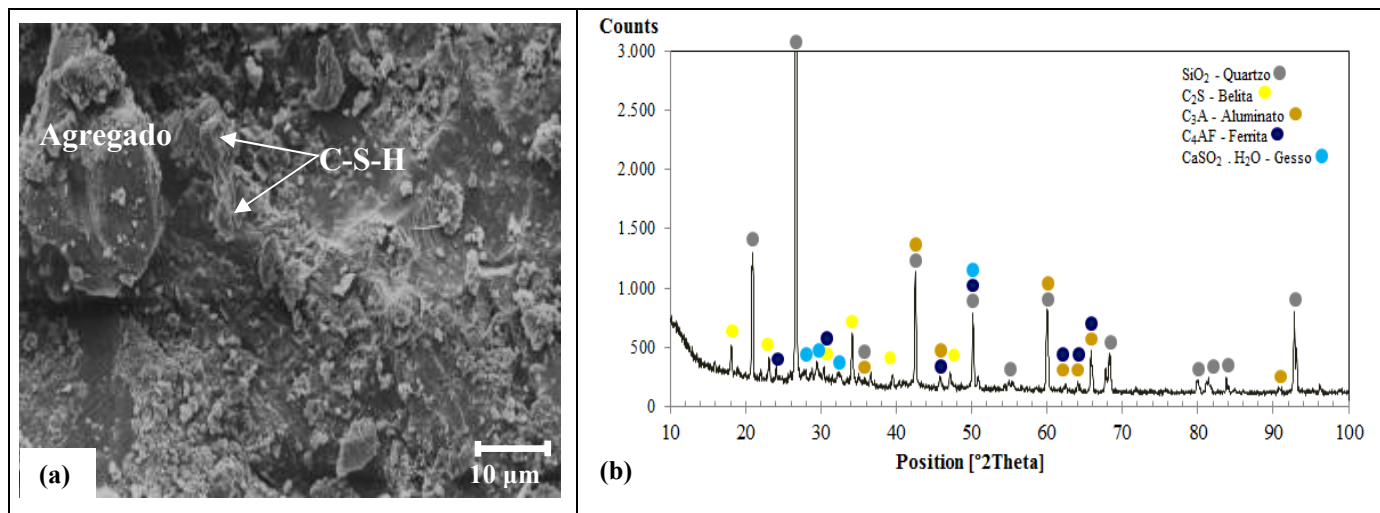
Segundo Gondim (2005) o concreto de cimento Portland possui uma estrutura bastante heterogênea e complexa, no qual identificam-se macroscopicamente dois principais constituintes: a pasta de cimento endurecida e as partículas de agregado. Entretanto, sob o ponto de vista microscópico a pasta de cimento em contato com outro material cimentício - sob interface - apresenta características diferentes do restante da pasta.

Com base nessas afirmações foram feitas então análises de difração de raios-X (DRX), bem como de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o objetivo de avaliar a interface matriz/agregados.

Na microscopia eletrônica de varredura, a fim de verificar diferenças qualitativas na microestrutura das amostras dos pavimentos com resíduos de galvanoplastia, são apresentadas micrografias nos aumentos de 1000 a 6000 vezes.

##### ***5.4.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios-X (DRX) dos BCP-PJ***

As Figuras 5.18 a 5.23 apresentam as micrografias e os difratogramas de raios-x, respectivamente, para os blocos referência, e aqueles fabricados com 5, 10, 15, 20 e 25% de poeira de jateamento, após 28 dias de idade de cura.

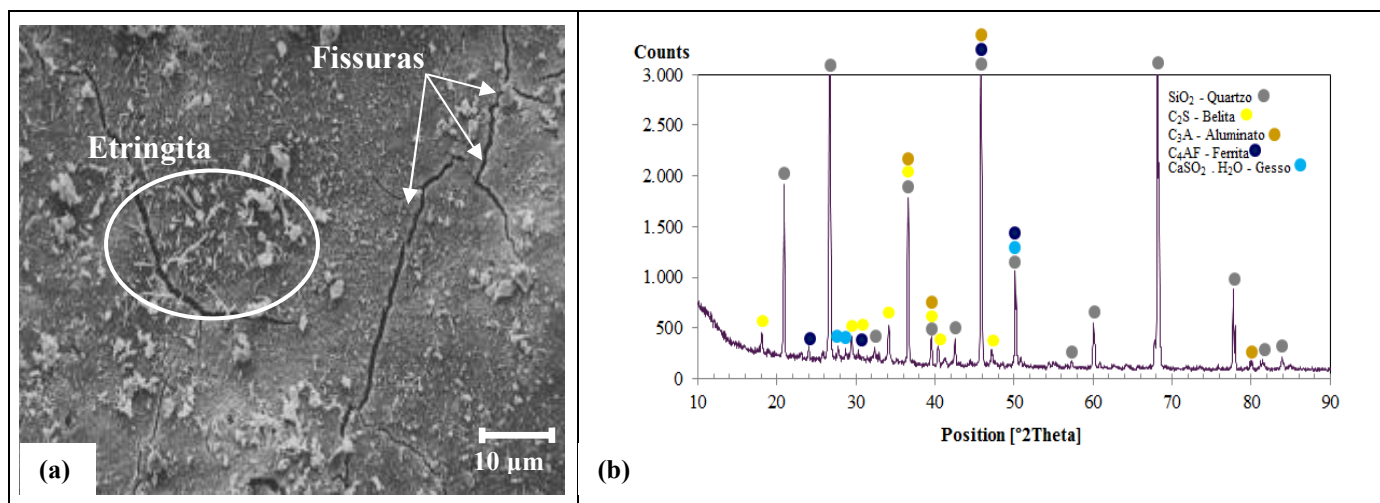


**Figura 5.18 - a) Micrografia (aumento de 1000x) e b) difratograma do BCP-REF, 28 dias**

A micrografia com resolução de 1000 vezes, Figura 5.18a, permite observar que o corpo de prova referência (REF) na idade de 28 dias, apresenta compostos semelhantes aos silicatos hidratados C-S-H, que segundo Mehta e Monteiro (1994), são responsáveis pela constituição de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado, sendo por isso o mais importante componente na determinação das propriedades da pasta.

No difratograma, Figura 5.18b, observa-se que as fases cristalinas identificadas foram: quartzo ou óxidos de sílica (SiO<sub>2</sub>), com picos característicos próximos as posições de 21, 27, 32, 43, 50, 60, 68, 80, 81, 84 e 94°2θ e silicatos dicálcico ou belita (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> ou C<sub>2</sub>S), com picos nas posições 18, 24 30, 31, 35, 39 e 47°2θ, os aluminatos (37, 42, 46, 60, 62, 64, 66 e 91°2θ) e a ferrita (24, 30, 46, 50, 62, 64, 66°2θ).



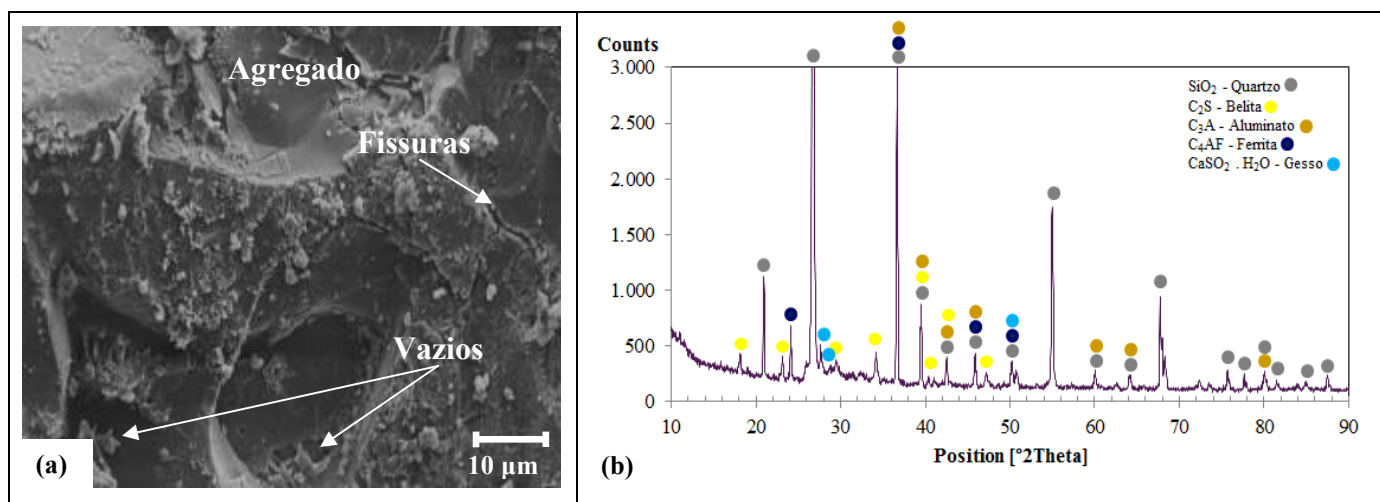


**Figura 5.19 - a) Micrografia (aumento de 1000x) e b) difratograma do BCP-PJ5, 28 dias**

Nos corpos de prova produzidos com PJ5, a micrografia na resolução de 1000 vezes (Figura 5.19a), apresenta pequenas fissuras na pasta cimentícia além de cristais aciculares que parecem ser de etringita. A hidratação dos aluminatos na presença de sulfato resulta na formação da etringita ( $C_6AS_3H_{32}$ ), que assumem formas aciculares e em monossulfatos hidratados com a forma de placas hexagonais delgadas, de acordo com o observado por Mehta e Monteiro (1994).

No difratograma (Figura 5.19b), observou-se estruturas cristalinas compostas de quartzo, silicatos dicálcico ou belita, aluminatos, ferrita.

A formação da etringita pode estar relacionada também ao aparecimento de fissuras devido a reações expansivas na pasta no estado endurecido.



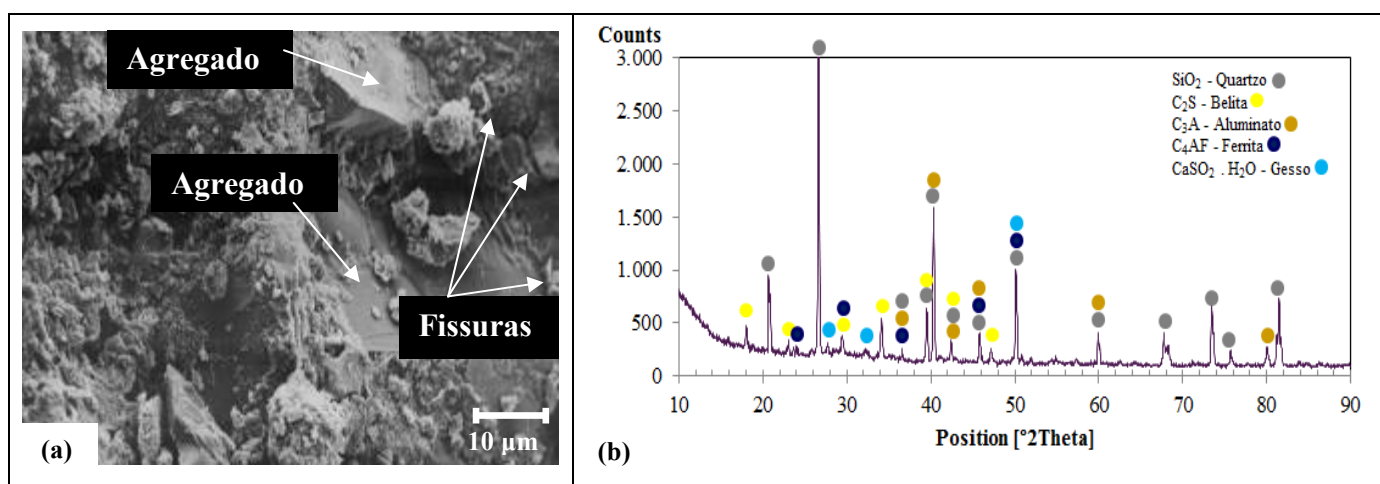
**Figura 5.20 – a) Micrografia (aumento de 1000x) e b) difratograma do BCP-PJ10, 28 dias**



A amostra de BCP com 10% de poeira de jateamento em substituição ao cimento apresentou fraturas na pasta, interface entre a pasta e o agregado e vazios capilares, conforme observado, por meio da micrografia com aumento de 1000 vezes, apresentada na Figura 5.20a.

De acordo com Moranville (1992) a porosidade na pasta com cimento Portland, fica entre 25 e 30% em volume para a relação água/cimento de 0,5, que é decomposta em dois tipos de cavidades ou vazios: poros entre os cristais C-S-H e poros capilares entre os compostos hidratados, além de bolhas e fissuras.

No difratograma, Figura 5.20b, observa-se que os picos das estruturas cristalinas se repetem como no BCP-PJ5, porém com menores intensidades do quartzo ou óxido de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e os silicatos dicálcico ou belita ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ).



**Figura 5.21 - a) Micrografia (aumento de 1000x) e b) difratograma do BCP–PJ15, 28 dias**

Na Figura 5.21a observa-se a interface entre a pasta cimentícia e agregado, além de algumas fissuras ao lado direito da micrografia. Para Gondim (2005) a interface entre os materiais, pode ser caracterizada pela presença de fissuras perpendiculares ao eixo longitudinal, originando planos preferenciais de ruptura, ou seja, caminhos de fissurações.

Quanto ao difratograma, Figura 5.21b, os picos de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e silicatos dicálcico ou belita ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ), sofreram queda na intensidade, o que pode relacionar-se a interação agregado/cimento.

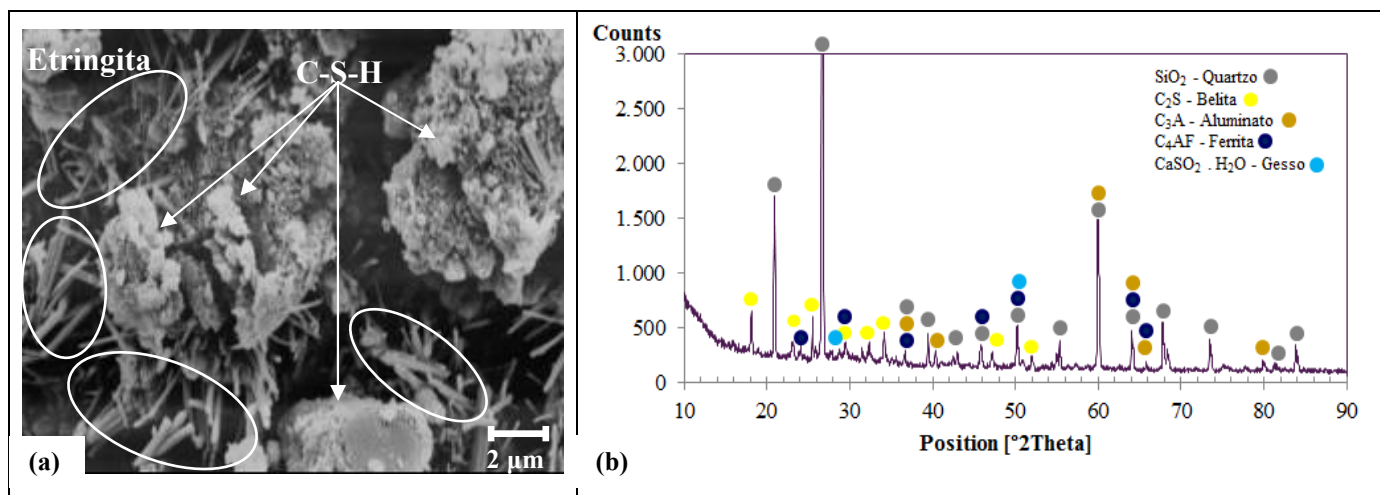


Figura 5.22 – a) Micrografia (aumento de 5000x) e b) difratograma do BCP–PJ20, 28 dias

Verifica-se na micrografia dos BCP-PJ20, Figura 5.22a, compostos semelhantes aos silicatos hidratados C-S-H, caracterizados por estrutura pequena e fibrilar (marcados com setas), além do que parece ser cristais aciculares de etringita ( $C_6AS_3H_{32}$ ), identificada com círculos, provavelmente oriunda da hidratação dos aluminatos, em presença de sulfato. O aumento da resolução (5000x) da micrografia teve o objetivo de verificar com mais veracidade os cristais de etringita.

A formação de agulhas de etringita começa minutos após o início da hidratação, sendo responsáveis pelo fenômeno da pega e desenvolvimento da resistência inicial, conforme observado por MEHTA e MONTEIRO (1994).

O difratograma, Figura 5.22b, mostra picos de quartzo ( $SiO_2$ ), que sofrem queda em sua intensidade entre 40 e 50°2θ, em relação aos BCP-PJ15, além dos picos com constante intensidade de silicatos dicálcico ( $Ca_2SiO_4$ ).

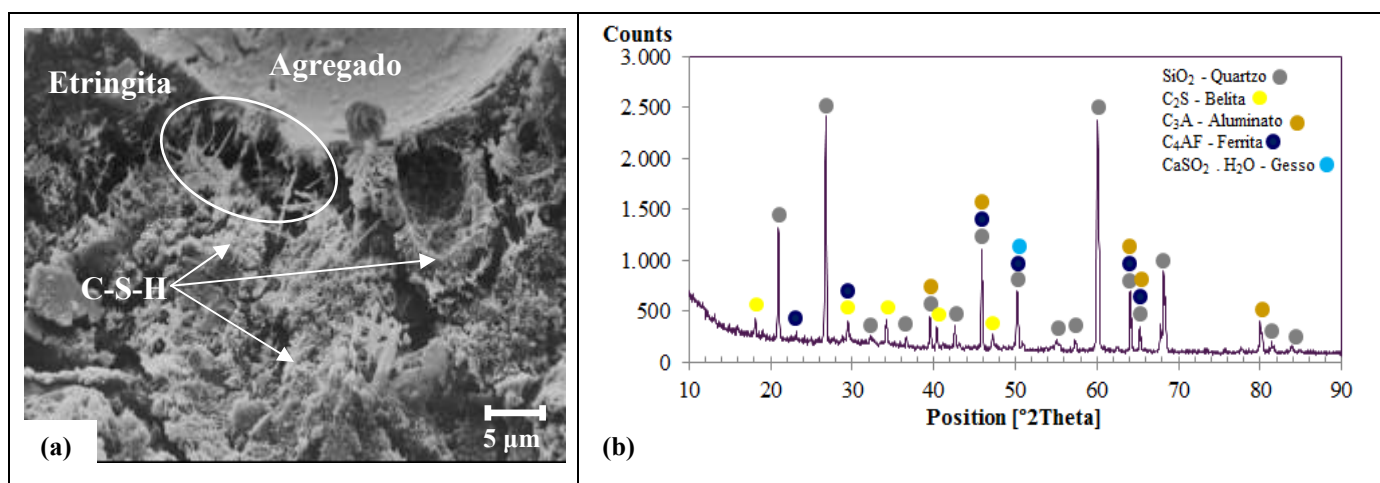


Figura 5.23 - a) Micrografia (aumento de 2000x) e b) difratograma do BCP–PJ25, 28 dias

Na proporção de 25% de substituição de cimento Portland por poeira de jateamento, a micrografia apresentada na Figura 5.23a, mostra a partir de uma resolução de 2000 vezes que há predominantemente, estrutura de silicatos hidratados C-S-H e poucas estruturas compostas por cristais aciculares de etringita ( $C_6AS_3H_{32}$ ), enquanto que no difratograma (Figura 5.23b), verifica-se que o pico do quartzo próximo de  $26^\circ 2\theta$  perde intensidade, e diminuem os picos com presença de silicatos dicálcico ( $Ca_2SiO_4$ ).

Gobbo (2009) descreve a predominância de picos de maior intensidade entre os ângulos 26 e  $27^\circ 2\theta$ , que representam três fases (grafita, mullita e quartzo), ocorrentes em cinzas volantes, esses picos são considerados pelo autor como os mais importantes para a identificação dessas fases. No presente trabalho verificou-se que esses picos ocorreram com muita intensidade nas amostras dos corpos de prova de referência, naqueles produzidos com poeira de jateamento, e com menor intensidade, nos corpos de prova com o lodo de galvanoplastia, conforme pode ser visto no item seguinte.

#### 5.4.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios-X (DRX) dos BCP-LG

As Figuras 5.24 a 5.29 apresentam as micrografias e os difratogramas de raios-X, respectivamente, para os blocos referência, e aqueles fabricados com 5, 10, 15, 20 e 25% de lodo de galvanoplastia, após 28 dias de idade de cura.

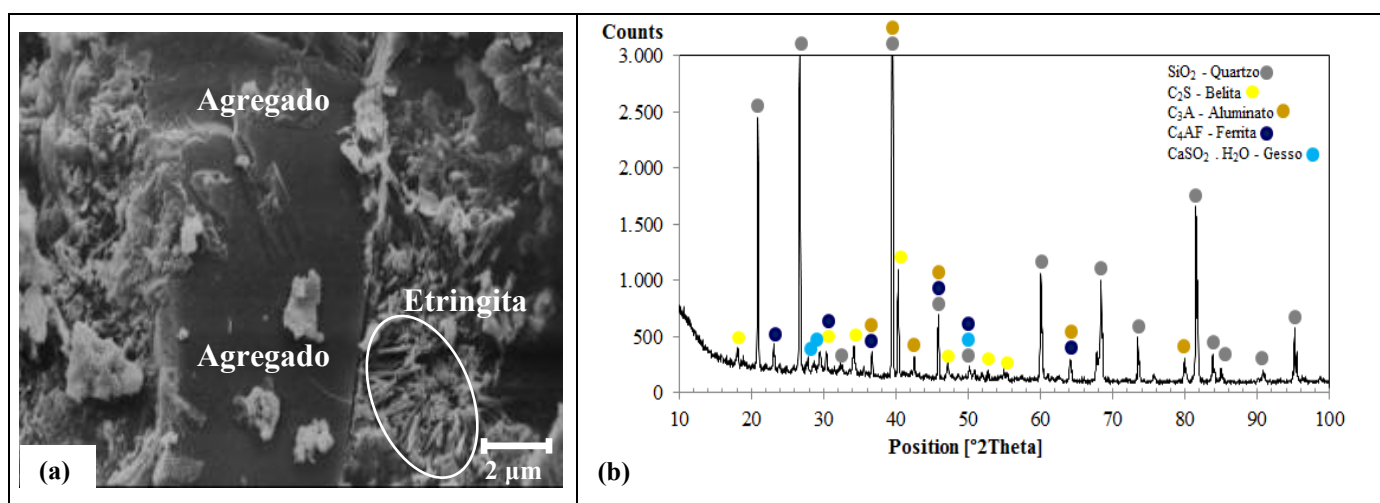


Figura 5.24 - a) Micrografia (aumento de 6000x) e b) difratograma do BCP-REF, 28 dias

A micrografia apresentada na Figura 5.24a, do corpo de prova referência (REF), na idade de 28 dias, permitiu observar a interface entre a pasta cimentícia e o agregado, além de cristais aciculares de etringita ( $C_6AS_3H_{32}$ ), visualizados somente no aumento de 6000 vezes, interação não observada na MEV para o bloco REF com a poeira de jateamento.

No difratograma (Figura 5.24b) observa-se picos próximos àqueles apresentados no BCP-REF para a poeira de jateamento, compostos por quartzo ( $SiO_2$ ) e silicatos dicálcico ( $Ca_2SiO_4$ ), bem como dois picos ( $40^\circ$  e  $82^\circ 2\theta$ ) superiores aos encontrados no REF com a poeira de jateamento, que deve estar relacionado a diferença na composição do cimento CPV-ARI

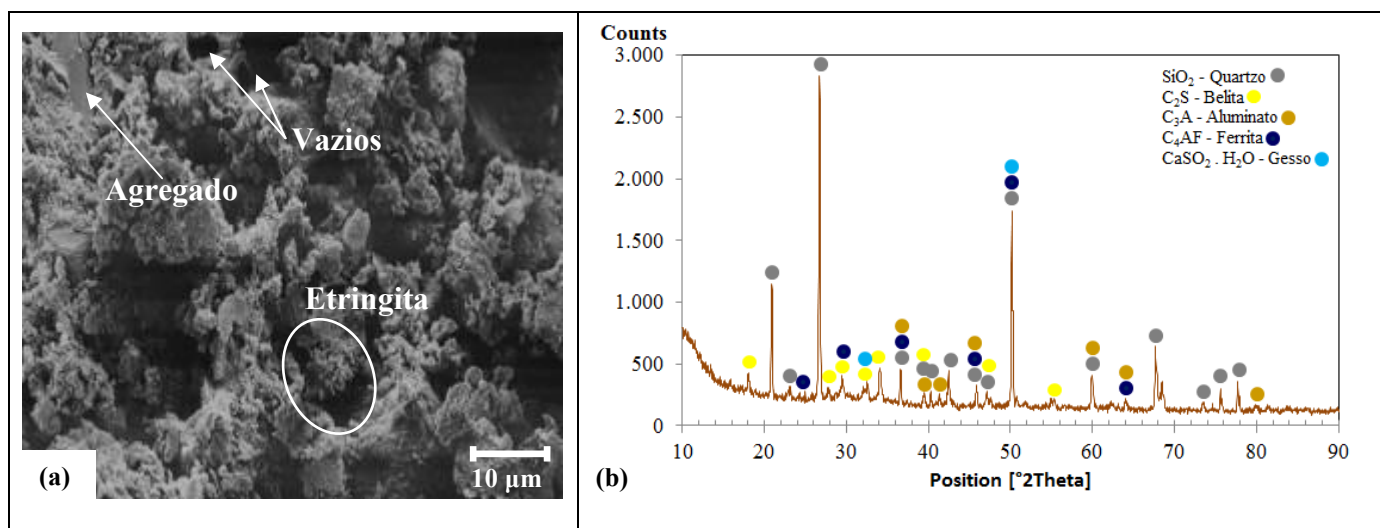


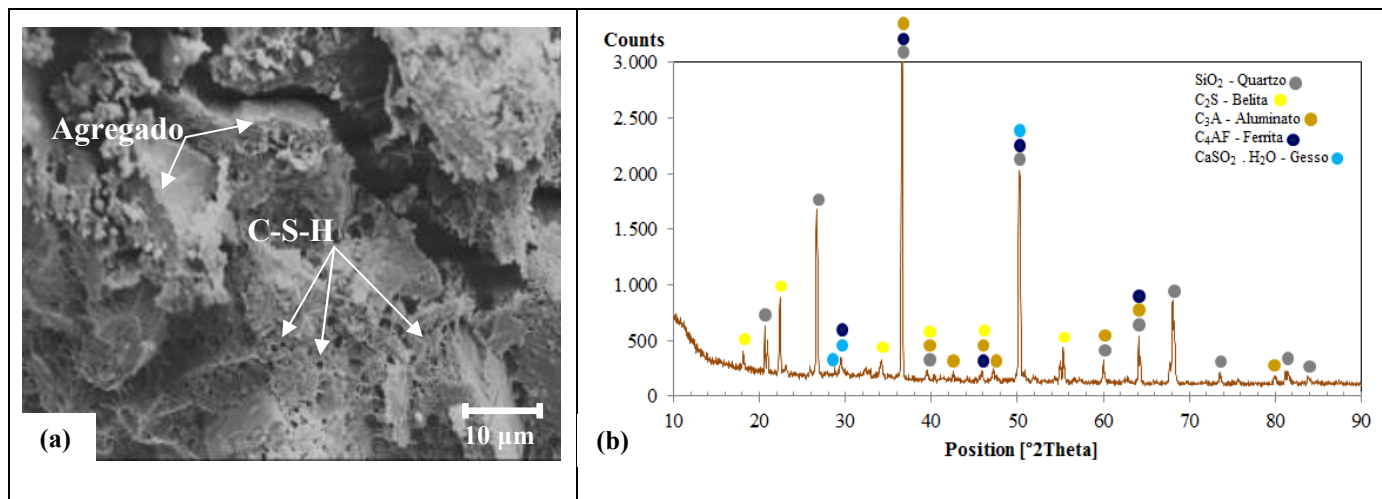
Figura 5.25- a) Micrografia (aumento de 1000x) e b) difratograma do BCP-LG5, 28 dias

Para os BCP-LG5, a micrografia apresentada na Figura 5.25a, permite observar interface entre a pasta cimentícia e agregados. A partir de um aumento de apenas 1000 vezes já nota-se a presença de vazios capilares e um pequeno arranjo cristalino que parece ser de etringita ( $C_6AS_3H_{32}$ ).

No gráfico da difração de raios-X, Figura 5.25b, observa-se a fase cristalina do silicato de cálcio ( $Ca_2SiO_4$ ) e a diminuição da intensidade dos picos de quartzo ( $SiO_2$ ).

A formação do C-S-H ocorre geralmente em conjunto com a formação da etringita, que são responsáveis pela resistência a compressão, salientando que, provavelmente, a presença do lodo galvanotécnico favoreceu a formação de etringita devido ao excesso de enxofre.

Tanto para os corpos de prova referência, como para aqueles produzidos com poeira de jateamento e com o lodo de galvanoplastia, foi observado que as associações dos silicatos dicálcicos ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ), modificados pela introdução de íons externos promoveram a reação lenta da água, contribuindo substancialmente com resistência posterior aos 28 dias.



**Figura 5.26 – a) Micrografia (aumento de 1500x) e b) difratograma do BCP-LG10, 28 dias**

Os silicatos de cálcio hidratado, observados a partir da resolução de 1500 vezes como mostra a micrografia (Figura 5.26a) estão vinculados ao estado endurecido do concreto, o também chamado “gel CSH”, que pode ser observado nas superfícies de fraturas do concreto em estágios iniciais, com aspectos caracterizados por Diamond (1976) em: Tipo I - fibroso, com fibras de aproximadamente 2μm de comprimento. Tipo II – descrito como colmeias de abelhas com formato reticular. E em estágios posteriores em: Tipo III – formato massivo, grãos com empacotamento fechado. Tipo IV – mais massivo.

Na pesquisa feita por Montanheiro *et al.* (2003), foram verificados microcompósitos mineralóides com formas rentilhadas, típicas de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), formadas após reação pozolânica, o que corrobora os resultados do presente trabalho, apresentados na micrografia da Figura 5.26a, para o BCP-LG10.



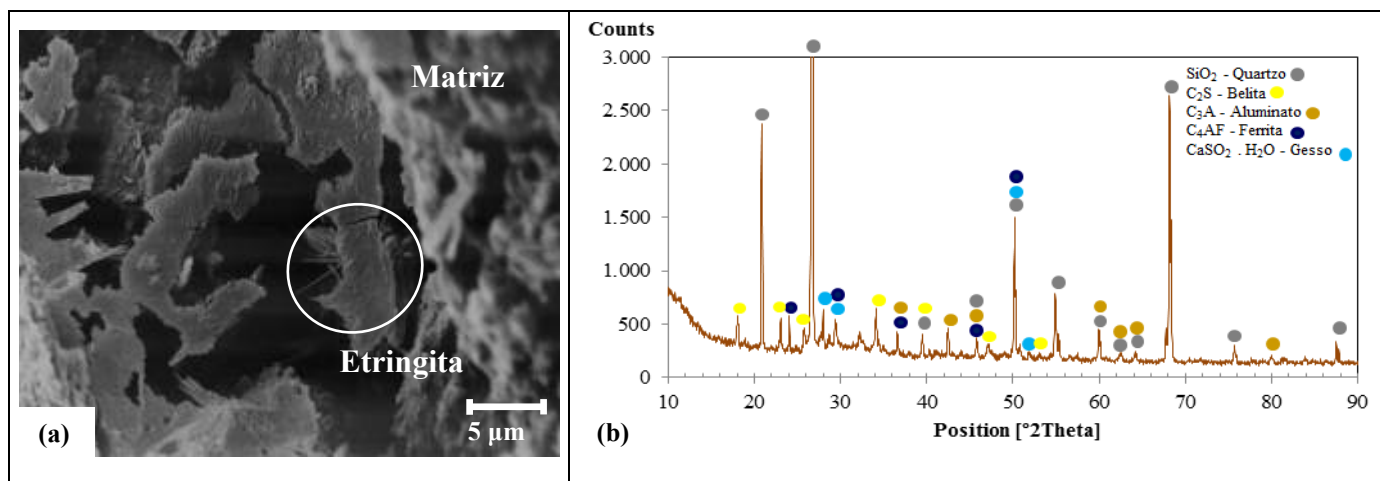


Figura 5.27 - a) Micrografia (aumento de 2000x) e b) difratograma do BCP-LG15, 28 dias

As propriedades da pasta se devem a formação de produtos cimentícios, como a etringita, devido à interação do lodo com a pasta hidratada, conforme pode ser observado na Figura 5.27a. Sabe-se que os formadores da etringita são Al, Ca e S, e que durante a mistura cimentícia, parte dos elementos sofrem reações com o cimento favorecendo a formação da mesma. O difratograma apresentado na Figura 5.27b, mostra que ocorreu uma maior quantidade de picos de menor intensidade nas faixas de 28 a 50°2θ, entre os silicatos, aluminatos e cálcio hidratados.

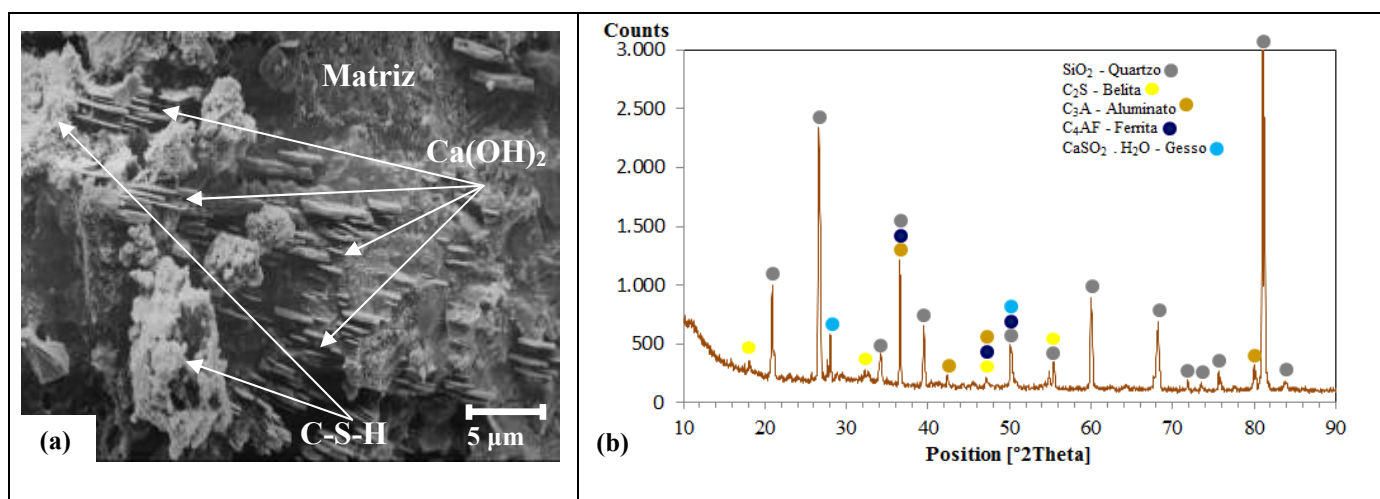
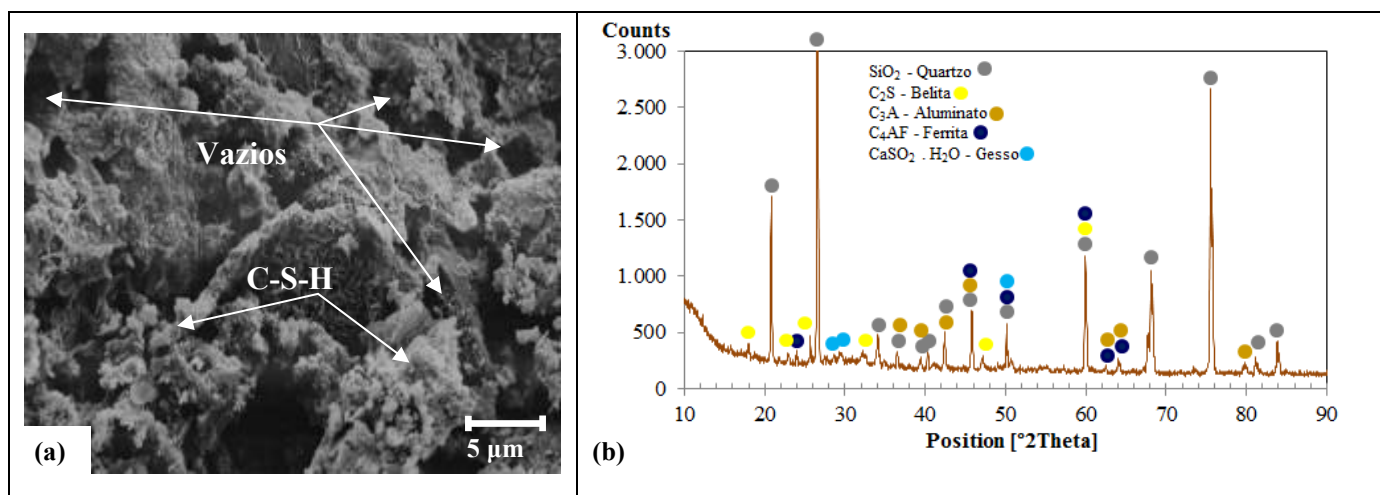


Figura 5.28 - a) Micrografia (aumento de 2000x) e b) difratograma do BCP-LG20, 28 dias

Montanheiro *et al.* (2003) relatam em seu estudo, que a análise por microscopia eletrônica de varredura na amostra de uma rocha constituída por quartzo, plagioclásio, cristobalita,

mordenita e hematita (classificada como dacito), permitiu confirmar que os compostos mineralóides na reação pozolânica, em formato placóide, são compostos químicos de silicatos hidratados de cálcio, alumínio, potássio, sódio e magnésio. Esse formato placóide pode também ser visualizado na micrografia com aumento de 2000 vezes (Figura 5.28a), tendo em vista a formação de estruturas cristalinas composta de cálcio hidratado ou também chamado portlandita e silicatos apresentados na Figura 5.28b.



**Figura 5.29 - a) Micrografia (aumento de 2000x) e b) difratograma do BCP-LG25, 28 dias**

A Figura 5.29a que correspondente ao BCP-LG25, mostra a partir de um aumento de 2000 vezes, arranjos do que parece ser silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), encontrados no início da hidratação do concreto, em que os vazios capilares são mais reduzidos.

Na Figura 5.29b, verifica-se que há formação de picos com intensidades semelhantes entre 30 e 50°2θ, atuando sobre os picos, os cristais de quartzo, aluminatos, belita, ferrita e cálcio hidratado.

## 6 CONCLUSÕES

---

Entre os resultados mais relevantes quanto à caracterização dos resíduos de galvanoplastia, estão a granulométrica dos resíduos, considerada satisfatória para a aplicação como agregado miúdo substituto ao cimento. Apesar dos resíduos de galvanoplastia não poderem ser considerados pozolanas artificiais, de acordo com os resultados obtidos nas análises de determinação de atividade pozolânica, por meio do método Chapelle Modificado, a poeira de jateamento mostrou quantidades relevantes de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3$ , que conforme a NBR 12653/1992 deve estar acima de 50%.

Quanto à periculosidade, a poeira de jateamento e o cimento foram classificados como resíduo classe I (perigoso) por apresentarem concentrações de cádmio e arsênio acima dos limites da NBR 10004/2004, respectivamente.

O lodo de galvanoplastia foi classificado como resíduo classe II A (não perigoso, não inerte), por apresentar todos os valores metais abaixo dos limites de detecção da norma.

O cimento utilizado na fabricação dos blocos de pavimentação apresentava uma concentração considerável de arsênio (As), verificado por meio dos ensaios de lixiviação e solubilização desse material, de acordo com a NBR 10004/2004. Acredita-se que essa característica contribuiu de forma significativa para os resultados obtidos de lixiviação e solubilização dos BCP produzidos, os quais mostraram concentrações desse metal, nos extratos lixiviado e solubilizado acima dos limites estabelecidos na norma técnica supracitada.

Não obstante a isso, acredita-se que a técnica de solidificação/estabilização se mostrou bastante promissora na incorporação destes resíduos em matriz cimentícia, o que pode ser confirmado por meio da microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X, que mostraram interações resíduo-cimento, decorrentes da formação de compostos mineralóides no processo de hidratação da pasta.

Com relação aos ganhos mecânicos, os corpos de prova produzidos com a poeira de jateamento nas proporções de 5%, 10% e 15%, apresentaram os valores de resistência a compressão aos 28 dias, de 42,60 MPa 37,57 MPa 35,6 Mpa, respectivamente, acima do limite estabelecido na norma brasileira, para pavimentação para veículos leves, que é de 35 MPa.



Cabe salientar ainda, que em todas as idades de rompimento os BCP-PJ5 apresentaram valores de resistência acima dos valores dos obtidos com os BCP-REF e superiores ao limite da norma, indicando boa interação matriz/agregado e constante relação água/aglomerante.

No entanto, os corpos de prova produzidos com o lodo de galvanoplastia se comportaram de forma diferente, muito provavelmente devido à relação água/aglomerante, limitada interação matriz/agregado, que influenciaram nos valores da resistência a compressão, onde, os BCP-LG5 apresentaram valores de resistência acima do limite estabelecido na norma brasileira (35,43 Mpa), no entanto, inferior ao alcançado para o BCP-REF (37,35 MPa).

Acredita-se, portanto, que as características físicas, químicas e principalmente microestruturais dos resíduos de galvanoplastia (poeira de jateamento e lodo de galvanoplastia), permitam que esses sejam passíveis de utilização como matéria-prima na construção civil, no entanto, para que essa prática possa ser viabilizada, faz-se necessário um esforço conjunto dos agentes envolvidos no processo, ou seja, a indústria de pré-moldados juntamente com a indústria galvanotécnica, com o intuito de se obter ganhos econômicos e principalmente ambientais.

## 7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

---

O presente trabalho foi uma contribuição no sentido de ampliar as possibilidades de utilização de resíduos galvanotécnicos na produção de blocos de concreto para pavimentação no setor da construção civil. Todavia, outros aspectos, relativos ao desempenho mecânico, absorção de água e durabilidade podem e devem ser estudados. Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se citar:

- a) Estudo aprofundado da faixa granulométrica, por meio de ensaios de granulometria a laser dos resíduos de galvanoplastia a ser utilizado na produção dos blocos;
- b) Metodologia de dosagem para substituição e adição dos resíduos no concreto;
- c) Avaliação de custos ambientais na aquisição dos resíduos e na disposição destes no meio ambiente;
- d) Avaliação das dosagens de substituições entre 1% e 5% da substituição parcial do cimento pelos resíduos de modo a identificar, nessa faixa, os valores significativos de resistência a compressão;
- e) Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos por meio de diferentes análises descritas nas normas brasileiras a título de comparação dos resultados a serem fornecidos por meio das seguintes metodologias:
  - Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland, seguindo as prescrições da NBR 5752/1992;
  - Determinação da atividade pozolânica com a cal, seguindo as prescrições da NBR 5751/1992;
- f) Aplicação dos resíduos galvanotécnicos de forma conjunta (PJ+LG) na produção de blocos de concreto para pavimentação em substituição ao cimento, verificando seu desempenho mecânico e microestrutural.
- g) Avaliação de outros tipos de cimento, com concentrações menores de arsênio em sua composição.

## 8 REFERÊNCIAS

---

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 52**: agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos – determinação da atividade pozolânica – índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992a.

\_\_\_\_\_. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992b.

\_\_\_\_\_. **NBR 6508**: solo- Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – determinação de massa específica MB-28 . Rio de Janeiro, ABNT, 1984a.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 9780**: peças de concreto para pavimentação determinação da resistência a compressão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 1987a.

\_\_\_\_\_. **NBR 9781**: peças de concreto para pavimentação – Especificação. Rio de Janeiro, ABNT, 1987b.

\_\_\_\_\_. **NBR 7217**: agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 1987c.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: solo- Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, ABNT, 1984b.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, ABNT, 2004a.

\_\_\_\_\_. **NBR 10005**: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, ABNT, 2004b.

\_\_\_\_\_. **NBR 10006**: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, ABNT, 2004c.

\_\_\_\_\_. **NBR 10007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, ABNT, 2004d.

\_\_\_\_\_. **NBR 12118**: blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio: determinação da absorção de água, teor de umidade e área líquida. Rio de Janeiro, ABNT, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653**: materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, ABNT, 1992c.

ALVES, D. A. **Materiais de Construção**. vol 1. 2ª ed. Ed. Nobel. São Paulo, SP. 1976.

ANJOS, M. A. S. **Adição do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados**. 2009. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN. 171p. 2009.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C618**: specifications for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement, 3p. 2003.

BORGO, S. C. **Minimização e reciclagem de lodo galvânico e poeira de jateamento**. 2005. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR. 2005.

BRESAOLA JÚNIOR, B.; CARRARA, S. M. C. M. Reúso de águas residuárias geradas em processos de galvanoplastia. XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais...** Porto Alegre – RS. 2000. Disponível em: <<http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/aresidua/i-099.pdf>> Acesso em 20 de Janeiro de 2010.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Decisão da Diretoria Nº 195/2005**. São Paulo-SP. Disponível em:<[http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/tabela\\_valores\\_2005.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/tabela_valores_2005.pdf)> Acesso em 12 de dezembro de 2010.

CHEILAS, A.; KATSIOTI, M.; GEORGIADES, A.; MALLIOU, O.; TEAS, C.; HANIOTAKIS, E. Impact of hardening conditions on to stabilized/solidified products of cement–sewage sludge–jarosite/alunite. **Cement & Concrete Composites**, n. 29. p. 263–269. 2007.

CHEN, D.; HOU, J.; YAO, L. H.; JIN, H. M.; QIAN, G. R.; XU, Z. P. Ferrite materials Prepared from two industrial wastes: electroplating sludge and spent pickle liquor. **Separation and Purification Technology**. 29p. 2010.

CIOFFI, R.; MAFFUCCI, L.; SANTORO, L.; GLASSER, F. P. Stabilization of chloro-organics using organophilic bentonite in a cement–blast furnace slag matrix. **Waste Manage**, v.21, n.7, p. 65–660. 2001.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto: Estudo dos elementos e métodos de dimensionamento**. 2003. 186p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ. 2003.

DEMIR, I. Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks, **Waste Management**, v.28, n. 3, p. 622-627, 2008.

DIAMOND, S. Hydraulic Cement Pastes: Their Structure and properties, p.2, **Cement and Concrete Association**, Slought, UK, 1976.

FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. 2007. 202p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos - SP. 2007.

FUNASA. FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de Saneamento**. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2004.

GHOSH, A.; SUBBARAO, C. Hydraulic conductivity and leachate characteristics of stabilized fly ash. **Journal of Environmental Engineering**. New York, v.124, n. 9, p.812-820, 1998.

GIFFONI, P. O. LANGE, L. C. A Utilização de borra de fosfato como matéria-prima alternativa para a fabricação de tijolos. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v.10, n.2, p. 128-136. 2005.

GIRALDELLI, M. A. **Alguns aspectos sobre a utilização do cimento portland com matriz para imobilização de rejeitos radioativos**. 1990. 88p. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear de Materiais). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Universidade de São Paulo, São Paulo - SP. 1990.

GOBBO, L. A. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland**. 2009. 273p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) Universidade de São Paulo – São Paulo – SP. 2009.

GOLLMANN, M. A.; SILVA, M. M.; MASUERO, A. B.; SANTOS, J. H. Z. Stabilization and solidification of Pb in cement matrices. **Journal of Hazardous Materials**, v.179, p.507-514. 2010.

GOMES, C. E. M. **Propriedades da pasta de cimento portland com adições de copolímero Va/VeoVa e fibras de poliamida – Estudo da interface fibra matriz**. 2005. 221 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo - SP. 2005.

GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. **Revista Ambiente Construído**, v.6, n.4, p. 83-94. 2006.

GONDIM, F. L. **Estudo da interface entre o concreto e o material de reparo mediante microscopia**. 2005. 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG. 2005.

GUILHERMINO, R. L. **Estudo de laboratório de um resíduo catalisador de equilíbrio para utilização em alvenaria na construção civil**. 2008. 167p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ. 2008.

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. 150 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS. 2006.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 2008. 3180p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo. São Paulo/SP. 2008.

HUANG, W. J.; CHU, S. C. A study on the cementlike properties of municipal waste incineration ashes, **Cement and Concrete Research**, v.33, n.11, p.1795-1799. 2003.

IERSI. INVENTÁRIO ESTADUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS DO ESTADO DO PARANÁ. **Relatório Jan/2004-Mai/2009**. 72p. 2009.

ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A. Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. **Waste Management Elsevier**. n. 29, p.655-659, 2009.

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, **Cement and Concrete Composites**, v.30, n.10, p.1013-1019, 2008.

KIPERSTOK, A.; COELHO, A.; TORRES, E.A.; MEIRA, C.C.; BRADLEY, S.P.; ROSEN, M. **Tecnologias e Gestão Ambiental: Prevenção da Poluição**. SENAI/DN. Brasília - DF. 290p. 2002.

KRAEMER, M. E. P. A questão ambiental e os resíduos industriais In: XXV ENEGEP - ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. **Anais...** Porto Alegre - RS, 2005.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonização em concretos e argamassas compostos por adição de sílica ativa**. 2002. 199p. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. 2002.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D. Uso de metacaulinita para incremento da durabilidade de compósitos à base de cimento reforçados com fibras de sisal. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre - RS, v. 8, n. 4, p. 7-19. 2008.

LUZ, C.A., ROCHA, J.C., CHERIAF, M. - Estudo de diferentes formas de cura empregadas em matrizes solidificadas. In: IV SEMINÁRIO - DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL - MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES, **Anais...** IBRACON, p. 151-157. São Paulo/SP. 2001.

MADRID, G. G. Acredite: Rodovias com intertravados já são realidade. **Revista Prisma**. Ed. n 10. 2004.

MAGALHÃES, A. G. **Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno**. 2007. 238p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG. 2007.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 ed. Ed. PATOFOS. 319p. Piracicaba – SP, 1997.

MARINHO, M., KIPERSTOK, A. Ecologia industrial e prevenção da poluição: Uma contribuição ao debate regional. **Revista Bahia análise & Dados**, Salvador – BA, v.10, n.4, p.271-279. 2001.

MASSAZZA, F. Pozzolanic Cements. **Cement & Concrete Composites**, v.15, p.185-214, 1993.

MÉDUCIN, F.; ZANNI, H.; NOIK, C.; HAMEL, G.; BRESSON, B. Tricalcium silicate (C3S) hydration under high pressure at ambient and high temperature (200 °C). **Cement and Concrete Research**, v.38, n. 3, p.320-324, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo – SP. Ed. PINI. 573p. 1994.

MILANEZ, K. W.; KNISS, C. T.; BERNARDIN, A. M.; RIELLA, H. G.; KUHNEN, N. C. Caracterização de pigmentos inorgânicos à base de Fe, Zn e Cr utilizando resíduo de galvanoplastia como matéria-prima. **Revista Cerâmica**. n 51, p.107-110. 2005.

MONTANHEIRO, T. J., YAMAMOTO, J. K., KIHARA, Y. Proposta de pré-qualificação pozolânica de materiais geológicos: difratometria de raios-X como método alternativo. **Revista Instituto Geológico**, São Paulo-SP, n. 24 (1/2), p.1-9, 2003. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/pdf/rig/v24n1-2/v24n1-2a01.pdf>

MORANVILLE, M. R. **Microstructure of high performance concrete**. In: MALIER, Y. High performance concrete - from material to structure. London, E & FN Spon, 13 p. 1992.

NITA, C. **Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose e pva**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP. 2006.

OLIVEIRA, A. L. **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-SC. 2004.

OLIVEIRA, C. A. S. **Avaliação microestrutural e comportamento físico e mecânico de concretos de alto desempenho produzidos com metacaulim**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG. 2007.

OLIVEIRA, M. P.; BARBOSA, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande-PB. v.10, n.2, p.490–496, 2006.

PABLOS, J. M. **Utilização de resíduo sólido gerado pelo descarte das areias de fundição aglomeradas com argila no setor da construção civil**. 1995. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo. São Carlos/SP. 1995.

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. 146p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo. São Carlos/SP. 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- RS. 2004.

PEREIRA, W. C.; MARCONDES E SILVA, D.; CARVALHO, J. O.; SOBRINHO, N. M. B. A.; RAVELLI NETO, A.; VILLAS BÔAS, R. C. Alternativas de utilização de resíduos sólidos alcalinos na disposição de resíduos contaminados: estudo de caso no estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Revista Engenharia Ambiental**. v.13, n. 2, p.163-170, 2008.

PERKINS, G. D. **Development of Concrete Containing Waste Glass.** 2007.

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 – RS. 2006.

PIACCF. **Panorama da indústria de artefatos de concreto, cimento e fibrocimento no Paraná.** p.114. Curitiba - PR. 2008. Disponível em: <[http://www.minerpar.pr.gov.br/arquivos/File/publicacoes/relatorios\\_concluidos/REL\\_FIM\\_ARTEFTAOS\\_BAK\\_211108.pdf](http://www.minerpar.pr.gov.br/arquivos/File/publicacoes/relatorios_concluidos/REL_FIM_ARTEFTAOS_BAK_211108.pdf)> Acesso em 10 de janeiro de 2011.

PONTE, H. A. **Tratamento líquido de efluentes de galvanoplastia.** Disciplina: Eletroquímica aplicada e corrosão - TQ – 417. 85p. Departamento de Engenharia Química da Universidade 2000.

QIAO, X. C.; TYRER, M.; POON C. S. Characterization of alkali-activated thermally treated incinerator bottom ash. **Waste Manager**, v.28, p.1955-1962. 2008.

RAVERDY, M.; BRIVOT, F.; PAILLIERE, A. M.; DRON, R. Atividade pozolânica: Procedimento CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-041 Determinação de atividade pozolânica - Método Chapelle modificado, CONGRÈS INTERNATIONAL DE LA CHIMIE DES CIMENTS, Paris. **Anais...** vol.3, n. 4, p.36-41, 1980.

REED, B. E.; CARRIERE, P. C.; MOORE, R. Flushing of Pb(II) contaminated soil using HCL, EDTA and CaCl<sub>2</sub>. **Journal of Enviromental Engineering**, London. v.122, n.1. 1996.

RODRIGUES, P. P. F. **Fabricação de blocos pré-moldados de concreto para pavimentação.** 2 ed. Associação Brasileira de Cimento Portlan (ABCP), São Paulo–SP. 1995.

ROY, D. M.; LANGTON, C. A. **Studies of ancient concretes as analogs of cementitious sealing materials for repository in Tuff.** L A-11527-MS. Los Alamos Nacional Laboratory, 1989.



SANTOS, F. I. G., ROCHA, J. C., CHERIAF, M. Influência da cinza pesada empregada em substituição ao agregado natural nos mecanismos de transferência de umidade em argamassas. **Revista Matéria**, v.12, n.2, p.253–268, 2007.

SANTOS, S.; PRUDÊNCIO Jr, L. R. Estudo comparativo da pozolanicidade de cinza volante e cinza de casca de arroz residual. In: VII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Florianópolis-SC. **Anais...** 1998.

SCHWARZ, N.; CAM, H.; NEITHALATH, N. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. **Cement & Concrete Composites** (Science Direct), n. 30(6), p. 486–96, 2008.

SESI, SERVIÇO SOCIAL DA INDÚSTRIA. 2007. **Manual de segurança e saúde no trabalho: Indústria Galvânica**. Coleção Manuais 2007. SESI-SP. Disponível em: <<http://www.abts.org.br/material/arquivos/utilitarios/manualgalvanica.pdf>>. Acesso em 20 de julho de 2009.

SHACKEL, B. **Design and Construction of Interlocking Concrete Block Pavement**. v.1. Ed. Elsevier, New York and London. 1990.

SHAO Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUEZ, D. Studies on concrete containing ground waste glass. **Cement and Concrete Research** (Science Direct), n. 30, p. 91–100, 2000.

SHAYAN, A., XU, A. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: a field trial on concrete slabs. **Cement and Concrete Research** (Science Direct), n. 36 (3), p. 457–468, 2006.

SHAYAN, A., XU, A. Value-added utilization of waste glass in concrete. **Cement and Concrete Research** (Science Direct), n.34 (1), p.81–89, 2004.

SHEHATA, M. H.; THOMAS, M. D. A.; BLESZYNSKI, R. F. The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v.29, n.12, p.1915-1920. 1999.

SHI, C.; SPENCE, R. Designing of cement-based formula for solidification/stabilization of hazardous, radioactive, and mixed wastes. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v.34, n.4, p.391-417, 2004.

SHI C.; WU, Y.; RIEFLER, C.; WANG, H.; Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. **Cement and Concrete Research** (Science Direct), n. 35, p. 987–93, 2005. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 18 de dezembro de 2009.

SILVA, A. C. **Incorporação de resíduo galvânico em vidro silicato a partir de finos de sílica**. 2004. 90p. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear de Materiais). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Universidade de São Paulo, São Paulo - SP. 2004.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de Análise Instrumental**. 5º ed. Ed. Bookman. Porto Alegre – RS. 2002.

SOTERO, R. H.; SOUZA, I. A.; RIVAS MERCURY, J. M. Aproveitamento de resíduo de bauxita na fabricação de blocos de pavimentação aglomerados com cimento. 53º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA. **Anais...** 2009.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**, 1º ed. Ed. Pini. São Paulo, SP. 1998.

SWAMY, R. N. **High-strength concrete. Material properties and structural behavior**. In: RUSSEL, H. G. (ed) High strength concrete. Detroit. American Concrete Institute, p. 119-146. 1986.

TASHIMA, M. M.; SILVA, C. A. R.; AKASAKI, J. L.; BARBOSA, M. B.; SILVA, E. J. Avaliação do teor de cinza de casca de arroz no concreto. IBRACON - Construções em Concreto (II.378-II.388). 46º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** 2004.

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry**. Academic Press. England, 1990.

THOMÉ, A. **Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais**. 1999. p.266. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. 1999.

TOLEDO, E. B. S. **Método de utilização de areia de fundição e resíduos de poeira de jateamento (microesferas de vidro) para produzir cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR. 2006.

USEPA. U.S. Environmental Protection Agency. **Technology performance review: Selecting and usingsolidification/stabilization treatment for site remediation**. Nov. 2009. Cincinnati, OH. Disponível em: <<http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r09148/600r09148.pdf>> .Acesso em 20 de janeiro de 2011.

VALLS, S. VÁZQUEZ, E. Stabilization and solidification of sewage sludges with Portland cement Pergamon. **Cement and Concrete Research**. v. 30, p.1671-1678. 2000.

VIEIRA, A. A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos**. 2005. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa/PB. 2005.

VIEIRA, F. P.; KULAKOWSKI, M. P.; DAL MOLIN, D.; VILELA, A. C. F. Estudos de durabilidade em concretos e argamassas com adição de microssilica. In: WORKSHOP DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, São Leopoldo-RS, v.1, p.107-116. **Anais...** 1997.

WHO, WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for Drinking – Water Quality**. Genova, v. 1, 128p. 1984.

ZHANG, M. H.; LASTRA, R.; MALHOTRA, V. M. Rice-husk ash paste and concrete: some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste. **Cement and Concrete Research**, v.26, n.6, p.963-977. 199

## **APÊNDICES**

**APÊNDICE 1: RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA MICROESFERA DE  
VIDRO**

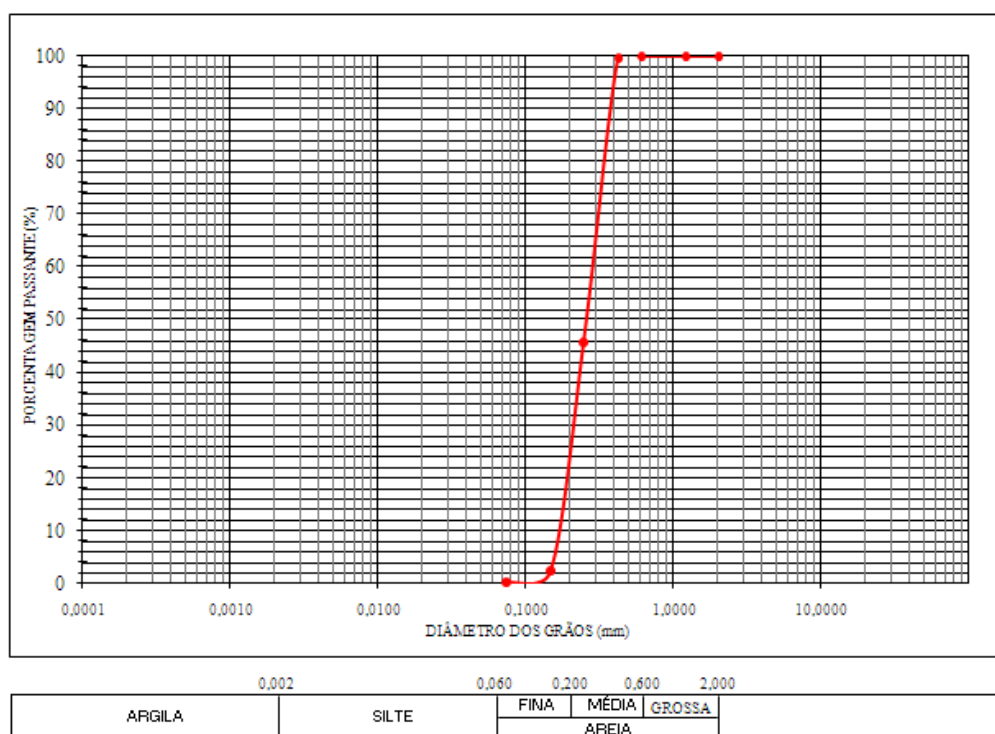
# 1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA MICROESFERA DE VIDRO

## 1.1 Granulometria

Na Tabela 1 e Figura 1 são apresentados os resultados do ensaio de granulometria, bem como a curva granulométrica de acordo com a NBR7181/1984.

**Tabela 1 - Distribuição granulométrica da microesfera de vidro**

| Peneira (mm)                    | Porcentagem Passante (%) |
|---------------------------------|--------------------------|
| 2,000                           | 100                      |
| 1,200                           | 100                      |
| 0,600                           | 100                      |
| 0,420                           | 100                      |
| 0,250                           | 46                       |
| 0,150                           | 2,5                      |
| 0,075                           | 0,2                      |
| Aspecto                         | Pó                       |
| pH                              | 7,07                     |
| Densidade (g.cm <sup>-3</sup> ) | 2,48                     |



**Figura 1 - Curva granulométrica da microesfera de vidro**

A granulometria da microesfera de vidro encontrou-se nas faixas entre areia fina e areia média (partículas entre 0,06 a 0,6 mm), com exceção da microesfera de vidro que foi utilizada apenas para caracterização.

## 2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA MICROESFERA DE VIDRO

### 2.1 Determinação de Metais por meio de Digestão Nitro-perclórica

Na tabela 2 são apresentadas as concentrações de metais nos resíduos, após extração via digestão nítrico-perclórica.

**Tabela 2 – Concentração média e desvio-padrão dos metais extraídos em digestão ácida**

| Parâmetros | Microesfera de Vidro<br>(mg.kg <sup>-1</sup> ) | Interv.Solo Industrial<br>(mg.kg <sup>-1</sup> )* | Interv. Água Subterrânea<br>(µg.L <sup>-1</sup> )** |
|------------|--|---|---|
| Alumínio   | 0,58 ± 0,1                                     | -   | 200   |
| Arsênio    | 1,51 ± 0,0                                     | 150   | 10  |
| Bário      | 0,50 ± 0,1                                     | 750   | 700   |
| Cádmio     | 0,02 ± 0,0                                     | 20  | 5   |
| Chumbo     | 0,26 ± 0,0                                     | 900   | 10  |
| Cálcio     | 1,37 ±   | -   | -   |
| Cobre      | 0,73 ± 0,4                                     | 600   | 200   |
| Cromo      | n.d  | 400   | 50  |
| Ferro      | 2,36 ± 0,2                                     | -   | 300   |
| Magnésio   | 0,71 ± 0,0                                     | -   | -   |
| Manganês   | n.d  | -   | 400   |
| Níquel     | n.d  | 130   | 20  |
| Selênio    | n.d  | -   | 10  |
| Sódio      | 14,17 ± 4,9                                    | -   | -   |
| Zinco      | 0,94 ± 0,7                                     | 2.000   | 5.000   |

\* Intervenção em Solo Industrial (mg.kg<sup>-1</sup> peso seco) - Área de Proteção Máxima (APMax) segundo CETESB DD 195 (2005). \*\*Intervenção em Água Subterrânea (µg.L<sup>-1</sup>), segundo CETESB DD 195 (2005).

Verifica-se que a microesfera de vidro não apresentou nenhum metal acima dos limites estabelecidos na legislação brasileira.

### 2.2 Lixiviação e Solubilização

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentadas os teores de metais determinados nos extratos lixiviado e solubilizado, respectivamente, bem como os limites máximos permitidos nesses extratos pela NBR 1004/2004, que constam nos Anexos F e G da referida norma.

**Tabela 3 - Concentração de metais no extrato lixiviado da microesfera de vidro**

| Parâmetros | Concentração (mg.L <sup>-1</sup> ) |  |
|------------|------------------------------------|--|
|            | Microesfera de Vidro               | Limite máximo NBR 10004/2004 (Anexo F) |
| Arsênio    | 0,92                               | 1,00                                   |
| Bário      | 0,39                               | 70,00                                  |
| Cádmio     | 0,04                               | 0,50                                   |
| Chumbo     | 0,34                               | 1,00                                   |
| Cromo      | n.d                                | 5,00                                   |
| Mercúrio   | 0,01                               | 0,10                                   |
| Fluoreto   | n.d                                | 150,00 <sup>*)</sup>                   |
| Prata      | n.d                                | 5,00 <sup>*)</sup>                     |
| Selênio    | n.d                                | 1,00                                   |

<sup>\*)</sup> Parâmetro e limite máximo no lixiviado extraídos da *USEPA - Environmental Protection Agency 40 CFR - Part 261 - 24 - "Toxicity Characteristics"*. <sup>\*\*)</sup> Parâmetro e limite máximo no lixiviado mantido, extraído da versão anterior da ABNT NBR 10004/1987. n.d: valor não detectado pelo equipamento.

Como pode ser visto na Tabela 3, a concentração de todos os elementos da microesfera de vidro e do lodo de galvanoplastia se encontraram abaixo do limite do anexo F da NBR 10004/2004. Necessitando do ensaio de solubilização, apresentado conforme a Tabela 4.

Os resultados de solubilização apresentados permitem observar que a microesfera de vidro apresentou concentrações de arsênio (As) e chumbo (Pb) superiores aos limites do anexo G da NBR 10004/2004, passando a ser classificado como resíduo Classe II A: Não perigoso/Não inerte.

Tabela 4 - Concentração de metais no extrato solubilizado da microesfera de vidro

| Parâmetros | Concentração (mg.L <sup>-1</sup> ) |  |
|------------|------------------------------------|--|
|            | Microesfera de Vidro               | Limite máximo NBR 10004:2004 (Anexo G) |
| Alumínio   | n.d                                | 0,20                                   |
| Arsênio    | <b>0,88</b>                        | 0,01                                   |
| Bário      | 0,62                               | 0,70                                   |
| Cádmio     | n.d                                | 0,005                                  |
| Chumbo     | <b>0,26</b>                        | 0,01                                   |
| Cloreto    | 1,43                               | 250,00                                 |
| Cobre      | 0,13                               | 2,00                                   |
| Cromo      | n.d                                | 0,05                                   |
| Ferro      | 0,05                               | 0,30                                   |
| Fluoreto   | 0,35                               | 1,50                                   |
| Manganês   | n.d                                | 0,10                                   |
| Mercúrio   | n.d                                | 0,001                                  |
| Nitrato    | 4,36                               | 10,00                                  |
| Prata      | n.d                                | 0,05                                   |
| Selênio    | 0,01                               | 0,01                                   |
| Sódio      | 23,38                              | 200,00                                 |
| Sulfato    | 1,17                               | 250,0                                  |
| Zinco      | 0,13                               | 5,00                                   |

### 2.3 Atividade Pozolânica

Para Raverdy *et al.* (1980), os materiais com potencial aglomerante ou potencial pozolânico, devem apresentar um consumo mínimo de 330 mg de CaO/g de amostra combinados com o cimento para obter concretos mais duráveis, daí a necessidade de se determinar essa variável. Valor acima do que foi encontrado no ensaio do Método Chapelle Modificado, de 43,0 mg CaO/g de microesfera de vidro, não caracterizando este material como pozolânico.



### 3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA MICROESFERA DE VIDRO

#### 3.1 Fluorescência de Raios-X

A fluorescência de raios-X tem fundamental importância no que se refere à atividade pozolânica, pois, esclarece de forma quantitativa os valores dos minerais interferentes para tal finalidade. Na Tabela 4 são apresentadas as propriedades da microesfera de vidro.

**Tabela 4 - Concentração (%) dos elementos avaliados por fluorescência de raios-X**

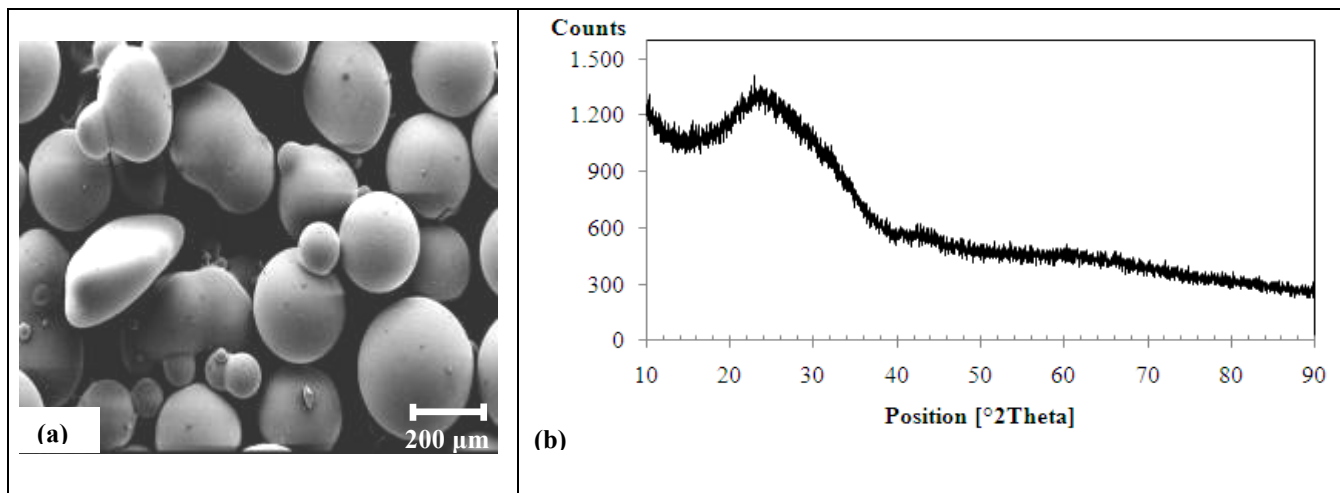
| FRX (% massa)                  | Microesfera de Vidro |
|--------------------------------|----------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | <b>62,09</b>         |
| CaO                            | 34,44                |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | <b>1,40</b>          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | <b>0,82</b>          |
| K <sub>2</sub> O               | 1,17                 |

De acordo com a NBR 12653/1992, os materiais pozolânicos podem ser classificados em três grupos, baseando-se no primeiro parâmetro (SiO<sub>2</sub>), na origem e na soma dos materiais SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> da porcentagem mínima são divididas em Classe N ou 70%; Classe C a 70% e Classe a 50% dos constituintes. Para a microesfera de vidro a soma dos materiais resultou em 64,31%, valor considerado para materiais pozolânicos de acordo com a norma.

#### 3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios-X (DRX)

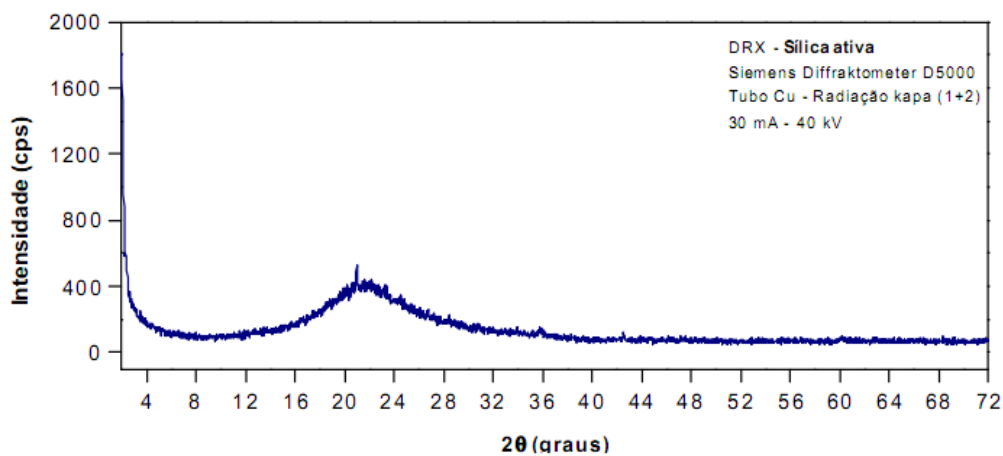
A microscopia eletrônica de varredura da microesfera de vidro, Figura 2a, mostra um aspecto físico homogêneo, este é um material comercialmente utilizado em indústrias e por meio do difratograma apresentado na Figura 2b, detectou-se a fase cristalina amorfa, característica do vidro.

Segundo Montanheiro *et al.* (2003), a difração de raios-X é uma poderosa ferramenta para pré-qualificação da atividade pozolânica de um material e seus componentes destacam-se como uma banda amorfa do difratograma, no intervalo 2 $\theta$ , entre 18 e 32°. Esta observação vai ao encontro dos resultados apresentados na Figura 2b, para a microesfera de vidro.



**Figura 2 – a) Micrografia (aumento 60x) e b) difratograma da microesfera de vidro**

No difratograma (Figura 3), realizado no estudo de Kulakowski (2002) observa-se que o pico de menor intensidade (em torno de 400 counts) e  $2\theta$  em torno de  $22^\circ$  característico da sílica ativa é semelhante a banda amorfa encontrada para a microesfera de vidro, com intensidade em torno de 1200 counts e  $2\theta$  em torno de  $22^\circ$ .



**Figura 3 – Difratograma da sílica ativa**

**Fonte: KULAKOWSKI, 2002**

**APÊNDICE 2: RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA PARA OS BLOCOS  
COM POEIRA DE JATEAMENTO**

### Absorção de água dos BCP-PJ aos 7 dias

| BCP  | 7dias                    |                          |                          |                          |          |           |         |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|-----------|---------|
|      | Peso inicial (g)         | 24hs estufa              | 24hs submerso            | 26hs submerso            | Abs. (%) | Média (%) | Desvpad |
| REF  | <b>18/10/2010 - 14hs</b> | <b>19/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 18hs</b> | 4,62     | 4,37      | 0,54    |
|      | 2941,3                   | 2892,0                   | 3015,6                   | 3025,7                   |          |           |         |
|      | 2968,9                   | 2914,7                   | 3034,8                   | 3052,4                   | 4,72     |           |         |
|      | 3427,1                   | 3370,9                   | 3482,8                   | 3497,3                   | 3,75     |           |         |
| PJ5  | <b>18/10/2010 - 14hs</b> | <b>19/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 18hs</b> | 3,21     | 3,13      | 0,08    |
|      | 3432,3                   | 3378,0                   | 3464,7                   | 3486,4                   |          |           |         |
|      | 3457,7                   | 3397,5                   | 3478,9                   | 3503,5                   | 3,12     |           |         |
|      | 3337,1                   | 3282,4                   | 3363,3                   | 3382,4                   | 3,05     |           |         |
| PJ10 | <b>18/10/2010 - 14hs</b> | <b>19/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 18hs</b> | 2,86     | 2,87      | 0,01    |
|      | 3459,2                   | 3410,3                   | 3486,5                   | 3507,8                   |          |           |         |
|      | 3490,6                   | 3437,8                   | 3516,1                   | 3536,4                   | 2,87     |           |         |
|      | 3542,6                   | 3486,4                   | 3564,2                   | 3586,5                   | 2,87     |           |         |
| PJ15 | <b>18/10/2010 - 14hs</b> | <b>19/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 18hs</b> | 6,07     | 4,17      | 1,66    |
|      | 3455,7                   | 3401,0                   | 3581,3                   | 3607,4                   |          |           |         |
|      | 3537,7                   | 3483,8                   | 3562,1                   | 3586,6                   | 2,95     |           |         |
|      | 3566,2                   | 3512,8                   | 3603,5                   | 3635,7                   | 3,50     |           |         |
| PJ20 | <b>18/10/2010 - 14hs</b> | <b>19/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 18hs</b> | 2,80     | 3,00      | 0,24    |
|      | 3458,3                   | 3408,8                   | 3492,3                   | 3504,1                   |          |           |         |
|      | 3436,4                   | 3387,9                   | 3477,1                   | 3498,5                   | 3,26     |           |         |
|      | 3544,7                   | 3490,1                   | 3577,1                   | 3593,2                   | 2,95     |           |         |
| PJ25 | <b>18/10/2010 - 14hs</b> | <b>19/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 18hs</b> | 3,08     | 3,52      | 0,39    |
|      | 3341,4                   | 3293,9                   | 3378,7                   | 3395,2                   |          |           |         |
|      | 3399,0                   | 3350,5                   | 3440,3                   | 3478,5                   | 3,82     |           |         |
|      | 3429,8                   | 3373,1                   | 3472,2                   | 3496,2                   | 3,65     |           |         |

### Absorção de água dos BCP-PJ aos 14 dias

| BCP  | 14 dias                  |                          |                          |                          |         |           |         |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------|-----------|---------|
|      | Peso inicial (g)         | 24hs estufa              | 24hs submerso            | 26hs submerso            | Abs.(%) | Média (%) | Desvpad |
| REF  | <b>25/10/2010 - 14hs</b> | <b>26/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 18hs</b> | 6,04    | 4,84      | 1,20    |
|      | 2947,2                   | 2892,9                   | 3022,0                   | 3067,5                   |         |           |         |
|      | 2975,1                   | 2921,2                   | 3040,0                   | 3062,9                   | 4,85    |           |         |
|      | 3416,5                   | 3364,3                   | 3475,2                   | 3486,5                   | 3,63    |           |         |
| PJ5  | <b>25/10/2010 - 14hs</b> | <b>26/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 18hs</b> | 3,64    | 3,30      | 0,37    |
|      | 3429,3                   | 3381,4                   | 3474,6                   | 3504,6                   |         |           |         |
|      | 3447,2                   | 3389,6                   | 3480,7                   | 3503,5                   | 3,36    |           |         |
|      | 3329,7                   | 3280,2                   | 3366,1                   | 3375,6                   | 2,91    |           |         |
| PJ10 | <b>25/10/2010 - 14hs</b> | <b>26/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 18hs</b> | 3,30    | 3,51      | 0,19    |
|      | 3446,9                   | 3392,6                   | 3483,4                   | 3504,6                   |         |           |         |
|      | 3478,1                   | 3419,5                   | 3527,2                   | 3545,2                   | 3,68    |           |         |
|      | 3523,3                   | 3474                     | 3570,9                   | 3597,4                   | 3,55    |           |         |
| PJ15 | <b>25/10/2010 - 14hs</b> | <b>26/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 18hs</b> | 3,79    | 3,61      | 0,18    |
|      | 3438,7                   | 3383,8                   | 3487,6                   | 3512,1                   |         |           |         |
|      | 3522,8                   | 3475,3                   | 3568                     | 3594,3                   | 3,42    |           |         |
|      | 3548,7                   | 3497,4                   | 3601,9                   | 3623,8                   | 3,61    |           |         |
| PJ20 | <b>25/10/2010 - 14hs</b> | <b>26/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 18hs</b> | 4,19    | 3,93      | 0,35    |
|      | 3442,4                   | 3387,9                   | 3494,7                   | 3529,7                   |         |           |         |
|      | 3421,6                   | 3368                     | 3478,8                   | 3505,1                   | 4,07    |           |         |
|      | 3529,3                   | 3476,9                   | 3582,1                   | 3599,7                   | 3,53    |           |         |
| PJ25 | <b>25/10/2010 - 14hs</b> | <b>26/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 18hs</b> | 4,93    | 4,80      | 0,14    |
|      | 3313,5                   | 3250                     | 3379,1                   | 3410,3                   |         |           |         |
|      | 3375,6                   | 3316,2                   | 3446,5                   | 3475,8                   | 4,81    |           |         |
|      | 3415                     | 3360,4                   | 3476,1                   | 3516,5                   | 4,65    |           |         |

### Absorção de água dos BCP-PJ aos 28 dias

| BCP  | 28 dias                  |                          |                          |                          |          |           |         |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|-----------|---------|
|      | Peso inicial (g)         | 24hs estufa              | 24hs submerso            | 26hs submerso            | Abs. (%) | Média (%) | Desvpad |
| REF  | <b>08/11/2010 - 14hs</b> | <b>09/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 18hs</b> | 4,88     | 4,55      | 0,29    |
|      | 2978,6                   | 2925,1                   | 3029,9                   | 3067,8                   |          |           |         |
|      | 2998                     | 2943,7                   | 3049,1                   | 3075,1                   | 4,46     |           |         |
|      | 3441                     | 3387,4                   | 3479                     | 3533,5                   | 4,31     |           |         |
| PJ5  | <b>08/11/2010 - 14hs</b> | <b>09/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 18hs</b> | 3,00     | 2,95      | 0,20    |
|      | 3448,6                   | 3391,9                   | 3472,1                   | 3493,5                   |          |           |         |
|      | 3464,5                   | 3410,7                   | 3482,6                   | 3503,7                   | 2,73     |           |         |
|      | 3346,2                   | 3291,4                   | 3370,1                   | 3394,2                   | 3,12     |           |         |
| PJ10 | <b>08/11/2010 - 14hs</b> | <b>09/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 18hs</b> | 2,42     | 3,03      | 0,58    |
|      | 3462,1                   | 3409,7                   | 3486,9                   | 3492,3                   |          |           |         |
|      | 3494,7                   | 3441,3                   | 3530,8                   | 3564,3                   | 3,57     |           |         |
|      | 3540,2                   | 3486,4                   | 3571,2                   | 3594,5                   | 3,10     |           |         |
| PJ15 | <b>08/11/2010 - 14hs</b> | <b>09/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 18hs</b> | 2,65     | 2,80      | 0,17    |
|      | 3460,8                   | 3411,9                   | 3490,7                   | 3502,3                   |          |           |         |
|      | 3538,1                   | 3489,8                   | 3562,6                   | 3586,1                   | 2,76     |           |         |
|      | 3578,1                   | 3532,3                   | 3601,9                   | 3637,5                   | 2,98     |           |         |
| PJ20 | <b>08/11/2010 - 14hs</b> | <b>09/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 18hs</b> | 2,88     | 2,93      | 0,05    |
|      | 3468,4                   | 3411,5                   | 3498,9                   | 3509,8                   |          |           |         |
|      | 3450,3                   | 3396                     | 3485,1                   | 3497                     | 2,97     |           |         |
|      | 3560,6                   | 3502                     | 3586,8                   | 3604,5                   | 2,93     |           |         |
| PJ25 | <b>08/11/2010 - 14hs</b> | <b>09/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 18hs</b> | 3,28     | 3,74      | 0,58    |
|      | 3335,6                   | 3278,8                   | 3377,8                   | 3386,4                   |          |           |         |
|      | 3402,0                   | 3340,0                   | 3445,1                   | 3486,7                   | 4,39     |           |         |
|      | 3434                     | 3373,5                   | 3471,3                   | 3493,2                   | 3,55     |           |         |

### Absorção de água dos BCP-PJ aos 60 dias

| BCP  | 60 dias           |                   |                   |                   |          |           |         |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|-----------|---------|
|      | Peso inicial (g)  | 24hs estufa       | 24hs submerso     | 26hs submerso     | Abs. (%) | Média (%) | Desvpad |
| REF  | 10/12/2010 - 14hs | 11/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 18hs | 7,36     | 5,73      | 1,41    |
|      | 2937,9            | 2886,6            | 3053,6            | 3099              |          |           |         |
|      | 2962,8            | 2911,5            | 3047              | 3054,8            | 4,92     |           |         |
|      | 3402              | 3348,4            | 3475,4            | 3512,4            | 4,90     |           |         |
| PJ5  | 10/12/2010 - 14hs | 11/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 18hs | 4,84     | 4,42      | 0,38    |
|      | 3423,4            | 3368,9            | 3505              | 3532              |          |           |         |
|      | 3441,4            | 3385,1            | 3500,6            | 3531,6            | 4,33     |           |         |
|      | 3325              | 3276,4            | 3381,3            | 3410,5            | 4,09     |           |         |
| PJ10 | 10/12/2010 - 14hs | 11/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 18hs | 4,93     | 4,57      | 0,31    |
|      | 3438,6            | 3384,4            | 3537,1            | 3551,1            |          |           |         |
|      | 3465,3            | 3410,1            | 3554,9            | 3560,7            | 4,42     |           |         |
|      | 3515,6            | 3461,9            | 3596,6            | 3612,8            | 4,36     |           |         |
| PJ15 | 10/12/2010 - 14hs | 11/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 18hs | 5,25     | 4,71      | 0,49    |
|      | 3431,9            | 3363,1            | 3517,7            | 3539,8            |          |           |         |
|      | 35137             | 3465,2            | 3595,6            | 3623,7            | 4,57     |           |         |
|      | 3541,2            | 3484,4            | 3619,9            | 3634,5            | 4,31     |           |         |
| PJ20 | 10/12/2010 - 14hs | 11/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 18hs | 4,94     | 4,64      | 0,39    |
|      | 3441,5            | 3397,8            | 3529,9            | 3565,6            |          |           |         |
|      | 3422,7            | 3366,5            | 3478,1            | 3527,4            | 4,78     |           |         |
|      | 3523,6            | 3470,8            | 3602,8            | 3616,2            | 4,19     |           |         |
| PJ25 | 10/12/2010 - 14hs | 11/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 18hs | 5,25     | 5,32      | 0,47    |
|      | 3312,6            | 3250,8            | 3368,1            | 3421,6            |          |           |         |
|      | 3373,1            | 3287,9            | 3367              | 3479,1            | 5,82     |           |         |
|      | 3411,1            | 3354,1            | 3469,8            | 3517,7            | 4,88     |           |         |

### Absorção de água dos BCP-PJ aos 90 dias

| BCP  | 90 dias           |                   |                   |                   |          |           |         |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|-----------|---------|
|      | Peso inicial (g)  | 24hs estufa       | 24hs submerso     | 26hs submerso     | Abs. (%) | Média (%) | Desvpad |
| REF  | 10/01/2011 - 14hs | 11/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 18hs | 2,35     | 2,22      | 0,38    |
|      | 2924,26           | 2892,2            | 2959,2            | 2960,1            |          |           |         |
|      | 3002,4            | 2968,8            | 3042,8            | 3043,6            | 2,52     |           |         |
|      | 3434,2            | 3400,5            | 3460,5            | 3461,7            | 1,80     |           |         |
| PJ5  | 10/01/2011 - 14hs | 11/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 18hs | 1,38     | 1,37      | 0,29    |
|      | 3376,2            | 3359,9            | 3405,8            | 3406,3            |          |           |         |
|      | 3440,3            | 3424,5            | 3480,9            | 3481,4            | 1,66     |           |         |
|      | 3335,1            | 3319,2            | 3354,7            | 3355,1            | 1,08     |           |         |
| PJ10 | 10/01/2011 - 14hs | 11/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 18hs | 1,59     | 1,57      | 0,32    |
|      | 3410,8            | 3392,8            | 3446,1            | 3446,9            |          |           |         |
|      | 3478,3            | 3457,8            | 3521,7            | 3522,5            | 1,87     |           |         |
|      | 3529,1            | 3505,9            | 3548,6            | 3549,1            | 1,23     |           |         |
| PJ15 | 10/01/2011 - 14hs | 11/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 18hs | 2,19     | 1,81      | 0,34    |
|      | 3406,6            | 3389,6            | 3462,7            | 3463,7            |          |           |         |
|      | 3520,8            | 3497              | 3556,8            | 3557,4            | 1,73     |           |         |
|      | 3564,3            | 3540,2            | 3592,6            | 3593,9            | 1,52     |           |         |
| PJ20 | 10/01/2011 - 14hs | 11/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 18hs | 1,22     | 1,22      | 0,25    |
|      | 3412,4            | 3388,7            | 3429              | 3430,2            |          |           |         |
|      | 3439,1            | 3412,4            | 3460,9            | 3462,4            | 1,47     |           |         |
|      | 3556,6            | 3533,8            | 3565,9            | 3567,6            | 0,96     |           |         |
| PJ25 | 10/01/2011 - 14hs | 11/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 18hs | 2,21     | 2,17      | 0,04    |
|      | 3283,1            | 3245,1            | 3315,7            | 3316,8            |          |           |         |
|      | 3388,5            | 3350,1            | 3420,5            | 3421,9            | 2,14     |           |         |
|      | 3421,2            | 3382,6            | 3453,4            | 3455,2            | 2,15     |           |         |



**APÊNDICE 3: RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA PARA OS BLOCOS  
COM LODO DE GALVANOPLASTIA**

### Absorção de água dos BCP-LG aos 7 dias

| BCP  | 7dias                    |                          |                          |                          |          |           |         |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|-----------|---------|
|      | Peso inicial (g)         | 24hs estufa              | 24hs submerso            | 26hs submerso            | Abs. (%) | Média (%) | Desvpad |
| REF  | <b>18/10/2010 - 14hs</b> | <b>19/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 18hs</b> | 4,62     | 4,37      | 0,54    |
|      | 2941,3                   | 2892                     | 3015,6                   | 3025,7                   |          |           |         |
|      | 2968,9                   | 2914,7                   | 3034,8                   | 3052,4                   | 4,72     |           |         |
|      | 3427,1                   | 3370,9                   | 3482,8                   | 3497,3                   | 3,75     |           |         |
| LG5  | <b>18/10/2010 - 14hs</b> | <b>19/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 18hs</b> | 3,50     | 3,80      | 0,27    |
|      | 3590                     | 3502,1                   | 3611,2                   | 3624,8                   |          |           |         |
|      | 3416,7                   | 3327                     | 3439,2                   | 3460,8                   | 4,02     |           |         |
|      | 3386,5                   | 3296,3                   | 3410                     | 3423,7                   | 3,86     |           |         |
| LG10 | <b>18/10/2010 - 14hs</b> | <b>19/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 18hs</b> | 3,34     | 6,13      | 4,87    |
|      | 3559,2                   | 3482,5                   | 3585,3                   | 3598,9                   |          |           |         |
|      | 2893,8                   | 2816,2                   | 3146                     | 3147,3                   | 11,76    |           |         |
|      | 3612,7                   | 3537,1                   | 3649,7                   | 3653,8                   | 3,30     |           |         |
| LG15 | <b>18/10/2010 - 14hs</b> | <b>19/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 18hs</b> | 4,02     | 9,12      | 9,01    |
|      | 3295,1                   | 3229,3                   | 3347,2                   | 3359,1                   |          |           |         |
|      | 3196,5                   | 3130                     | 3235,3                   | 3249,3                   | 3,81     |           |         |
|      | 3085,2                   | 3016,6                   | 3162,2                   | 3605,7                   | 19,53    |           |         |
| LG20 | <b>18/10/2010 - 14hs</b> | <b>19/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 18hs</b> | 4,39     | 4,74      | 0,31    |
|      | 3037                     | 2967,6                   | 3094,2                   | 3097,8                   |          |           |         |
|      | 3209,2                   | 3141,3                   | 3295,9                   | 3298,2                   | 4,99     |           |         |
|      | 3219,2                   | 3150,5                   | 3298,1                   | 3302,6                   | 4,83     |           |         |
| LG25 | <b>18/10/2010 - 14hs</b> | <b>19/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 14hs</b> | <b>20/10/2010 - 18hs</b> | 5,16     | 5,73      | 0,56    |
|      | 3260,5                   | 3160,9                   | 3318,9                   | 3324,1                   |          |           |         |
|      | 3266,4                   | 3171,0                   | 3340,7                   | 3352,8                   | 5,73     |           |         |
|      | 3238,8                   | 3144,9                   | 3333,6                   | 3342,7                   | 6,29     |           |         |

**Absorção de água dos BCP-LG aos 14 dias**

| BCP  | 14 dias                  |                          |                          |                          |          |           |         |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|-----------|---------|
|      | Peso inicial (g)         | 24hs estufa              | 24hs submerso            | 26hs submerso            | Abs. (%) | Média (%) | Desvpad |
| REF  | <b>25/10/2010 - 14hs</b> | <b>26/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 18hs</b> | 6,04     | 4,84      | 1,20    |
|      | 2947,2                   | 2892,9                   | 3022,0                   | 3067,5                   |          |           |         |
|      | 2975,1                   | 2921,2                   | 3040,0                   | 3062,9                   | 4,85     |           |         |
|      | 3416,5                   | 3364,3                   | 3475,2                   | 3486,5                   | 3,63     |           |         |
| LG5  | <b>25/10/2010 - 14hs</b> | <b>26/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 18hs</b> | 3,14     | 3,59      | 0,40    |
|      | 3576,4                   | 3525,7                   | 3616                     | 3636,5                   |          |           |         |
|      | 3406,1                   | 3353,3                   | 3447,1                   | 3478,4                   | 3,73     |           |         |
|      | 3377,6                   | 3323,8                   | 3413,4                   | 3453,3                   | 3,90     |           |         |
| LG10 | <b>25/10/2010 - 14hs</b> | <b>26/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 18hs</b> | 5,42     | 6,81      | 4,95    |
|      | 3535,1                   | 3447,5                   | 3600,1                   | 3634,5                   |          |           |         |
|      | 2887,5                   | 2810,5                   | 3143,5                   | 3156,4                   | 12,31    |           |         |
|      | 3603,6                   | 3528,9                   | 3653,2                   | 3624,1                   | 2,70     |           |         |
| LG15 | <b>25/10/2010 - 14hs</b> | <b>26/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 18hs</b> | 4,88     | 5,18      | 3,04    |
|      | 3274,5                   | 3208,7                   | 3349,5                   | 3365,4                   |          |           |         |
|      | 3063,5                   | 2997,8                   | 3233,8                   | 3248,3                   | 8,36     |           |         |
|      | 3167,3                   | 3103,8                   | 3159,8                   | 3175,4                   | 2,31     |           |         |
| LG20 | <b>25/10/2010 - 14hs</b> | <b>26/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 18hs</b> | 6,05     | 5,41      | 0,55    |
|      | 3018,8                   | 2955,8                   | 3095,9                   | 3134,5                   |          |           |         |
|      | 3186                     | 3125,6                   | 3272                     | 3286,5                   | 5,15     |           |         |
|      | 3203,7                   | 3140,3                   | 3277,5                   | 3298,5                   | 5,04     |           |         |
| LG25 | <b>25/10/2010 - 14hs</b> | <b>26/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 14hs</b> | <b>27/10/2010 - 18hs</b> | 6,24     | 6,89      | 0,57    |
|      | 3226                     | 3132                     | 3302                     | 3327,5                   |          |           |         |
|      | 3214,4                   | 3128,0                   | 3330,7                   | 3350,4                   | 7,11     |           |         |
|      | 3198,3                   | 3111,5                   | 3318,6                   | 3338,9                   | 7,31     |           |         |

**Absorção de água dos BCP-LG aos 28 dias**

| BCP  | 28 dias                  |                          |                          |                          |          |           |         |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|-----------|---------|
|      | Peso inicial (g)         | 24hs estufa              | 24hs submerso            | 26hs submerso            | Abs. (%) | Média (%) | Desvpad |
| REF  | <b>08/11/2010 - 14hs</b> | <b>09/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 18hs</b> | 4,88     | 4,55      | 0,29    |
|      | 2978,6                   | 2925,1                   | 3029,9                   | 3067,8                   |          |           |         |
|      | 2998                     | 2943,7                   | 3049,1                   | 3075,1                   | 4,46     |           |         |
|      | 3441                     | 3387,4                   | 3479                     | 3533,5                   | 4,31     |           |         |
| LG5  | <b>08/11/2010 - 14hs</b> | <b>09/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 18hs</b> | 3,77     | 4,02      | 0,22    |
|      | 3597,8                   | 3511,3                   | 3618,9                   | 3643,6                   |          |           |         |
|      | 3426,3                   | 3339,4                   | 3442,8                   | 3476,4                   | 4,10     |           |         |
|      | 3394,7                   | 3307,1                   | 3421,6                   | 3445,3                   | 4,18     |           |         |
| LG10 | <b>08/11/2010 - 14hs</b> | <b>09/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 18hs</b> | 6,48     | 8,39      | 1,70    |
|      | 3553,6                   | 3478                     | 3697,7                   | 3703,4                   |          |           |         |
|      | 2958                     | 2883,3                   | 3157,8                   | 3164,5                   | 9,75     |           |         |
|      | 3631,6                   | 3548,2                   | 3654,1                   | 3865,4                   | 8,94     |           |         |
| LG15 | <b>08/11/2010 - 14hs</b> | <b>09/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 18hs</b> | 4,91     | 5,04      | 0,59    |
|      | 3291,6                   | 3227,0                   | 3371,6                   | 3385,6                   |          |           |         |
|      | 3190,9                   | 3124,4                   | 3249,9                   | 3265,9                   | 4,53     |           |         |
|      | 3083,7                   | 3016,2                   | 3170,8                   | 3187,5                   | 5,68     |           |         |
| LG20 | <b>08/11/2010 - 14hs</b> | <b>09/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 18hs</b> | 5,77     | 5,27      | 0,59    |
|      | 3032,8                   | 2963,3                   | 3116,9                   | 3134,2                   |          |           |         |
|      | 3209,3                   | 3141,8                   | 3280,9                   | 3312,1                   | 5,42     |           |         |
|      | 3218,7                   | 3153,1                   | 3286,5                   | 3298,6                   | 4,61     |           |         |
| LG25 | <b>08/11/2010 - 14hs</b> | <b>09/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 14hs</b> | <b>10/11/2010 - 18hs</b> | 4,86     | 5,36      | 0,51    |
|      | 3247,9                   | 3161,4                   | 3295,7                   | 3314,9                   |          |           |         |
|      | 3261,9                   | 3171,4                   | 3326,6                   | 3357,6                   | 5,87     |           |         |
|      | 3260,5                   | 3174                     | 3316,3                   | 3343,7                   | 5,35     |           |         |

**Absorção de água dos BCP-LG aos 60 dias**

| BCP  | 60 dias           |                   |                   |                   |          |           |         |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|-----------|---------|
|      | Peso inicial (g)  | 24hs estufa       | 24hs submerso     | 26hs submerso     | Abs. (%) | Média (%) | Desvpad |
| REF  | 10/12/2010 - 14hs | 11/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 18hs | 7,36     | 5,73      | 1,41    |
|      | 2937,9            | 2886,6            | 3053,6            | 3099              |          |           |         |
|      | 2962,8            | 2911,5            | 3047              | 3054,8            | 4,92     |           |         |
|      | 3402              | 3348,4            | 3475,4            | 3512,4            | 4,90     |           |         |
| LG5  | 10/12/2010 - 14hs | 11/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 18hs | 6,00     | 5,70      | 0,58    |
|      | 3572,3            | 3482,1            | 3678,1            | 3691,2            |          |           |         |
|      | 3399,4            | 3313,8            | 3471,1            | 3515              | 6,07     |           |         |
|      | 3373,3            | 3288,4            | 3446              | 3453,8            | 5,03     |           |         |
| LG10 | 10/12/2010 - 14hs | 11/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 18hs | 6,76     | 8,51      | 5,26    |
|      | 3518,7            | 3441,6            | 3654,2            | 3674,1            |          |           |         |
|      | 2874,6            | 2801,0            | 3159,7            | 3205,2            | 14,43    |           |         |
|      | 3597,7            | 3522,1            | 3651,8            | 3675,4            | 4,35     |           |         |
| LG15 | 10/12/2010 - 14hs | 11/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 18hs | 8,15     | 8,97      | 2,58    |
|      | 3257,8            | 3190,3            | 3411,2            | 3450,2            |          |           |         |
|      | 3155              | 3089,2            | 3402,3            | 3455,6            | 11,86    |           |         |
|      | 3056,5            | 2989              | 3184,9            | 3195,2            | 6,90     |           |         |
| LG20 | 10/12/2010 - 14hs | 11/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 18hs | 8,31     | 7,60      | 0,68    |
|      | 3000,2            | 2930,5            | 3161,4            | 3174,1            |          |           |         |
|      | 3167,9            | 3099,4            | 3310,2            | 3332,1            | 7,51     |           |         |
|      | 3186,4            | 3118,5            | 3297,4            | 3335,9            | 6,97     |           |         |
| LG25 | 10/12/2010 - 14hs | 11/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 14hs | 12/12/2010 - 18hs | 10,50    | 9,28      | 1,07    |
|      | 3204,8            | 3108,6            | 3421,1            | 3435,1            |          |           |         |
|      | 3209,9            | 3110,3            | 3352,5            | 3376,3            | 8,55     |           |         |
|      | 3190,8            | 3095,4            | 3335,8            | 3367              | 8,77     |           |         |

### Absorção de água dos BCP-LG aos 90 dias

| BCP  | 90 dias           |                   |                   |                   |          |           |         |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|-----------|---------|
|      | Peso inicial (g)  | 24hs estufa       | 24hs submerso     | 26hs submerso     | Abs. (%) | Média (%) | Desvpad |
| REF  | 10/01/2011 - 14hs | 11/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 18hs | 2,35     | 2,22      | 0,38    |
|      | 2924,6            | 2892,2            | 2959,2            | 2960,1            |          |           |         |
|      | 3002,4            | 2968,8            | 3042,8            | 3043,6            | 2,52     |           |         |
|      | 3434,2            | 3400,5            | 3460,5            | 3461,7            | 1,80     |           |         |
| LG5  | 10/01/2011 - 14hs | 11/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 18hs | 2,43     | 2,18      | 0,27    |
|      | 3543,2            | 3503,9            | 3581,1            | 3589,1            |          |           |         |
|      | 3379              | 3340,5            | 3410,9            | 3414,5            | 2,22     |           |         |
|      | 3451,5            | 3411,4            | 3475,5            | 3476,2            | 1,90     |           |         |
| LG10 | 10/01/2011 - 14hs | 11/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 18hs | 1,68     | 1,79      | 0,45    |
|      | 3491,8            | 3447,6            | 3504,4            | 3505,6            |          |           |         |
|      | 2942,1            | 2951,9            | 3017,1            | 3019,4            | 2,29     |           |         |
|      | 3599,2            | 3594,4            | 3642,8            | 3645,2            | 1,41     |           |         |
| LG15 | 10/01/2011 - 14hs | 11/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 18hs | 2,85     | 2,10      | 1,58    |
|      | 3237,4            | 3203,5            | 3292,5            | 3294,7            |          |           |         |
|      | 3182,7            | 3148,5            | 3155,4            | 3157,3            | 0,28     |           |         |
|      | 3081,3            | 3048,8            | 3140,1            | 3145,5            | 3,17     |           |         |
| LG20 | 10/01/2011 - 14hs | 11/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 18hs | 4,23     | 3,81      | 0,62    |
|      | 2986,2            | 2944,7            | 3068,7            | 3069,4            |          |           |         |
|      | 3211,3            | 3169              | 3296,4            | 3298,6            | 4,09     |           |         |
|      | 3289,5            | 3247,2            | 3345,5            | 3347,9            | 3,10     |           |         |
| LG25 | 10/01/2011 - 14hs | 11/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 14hs | 12/01/2011 - 18hs | 3,51     | 3,48      | 0,09    |
|      | 3232,2            | 3188,7            | 3298,3            | 3300,5            |          |           |         |
|      | 3250,8            | 3206,6            | 3314,6            | 3320,6            | 3,56     |           |         |
|      | 3232,9            | 3198,5            | 3305,5            | 3306,9            | 3,39     |           |         |

**APÊNDICE 4: VALORES DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO PARA OS  
BLOCOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR POEIRA DE  
JATEAMENTO**

**Resistência à compressão BCP-REF**

| REF            | 7 dias | REF            | 14 dias | REF            | 28 dias | REF            | 60 dias | REF            | 90 dias |
|----------------|--------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
|                | 03/abr |                | 10/abr  |                | 24/abr  |                | 26/mai  |                | 26/jun  |
|                | MPa    |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |
| <b>1</b>       | 27,70  | <b>7</b>       | 37,50   | <b>13</b>      | 38,00   | <b>19</b>      | 37,50   | <b>25</b>      | 44,40   |
| <b>2</b>       | 27,10  | <b>8</b>       | 33,10   | <b>14</b>      | 35,70   | <b>20</b>      | 41,40   | <b>26</b>      | 44,10   |
| <b>3</b>       | 26,30  | <b>9</b>       | 31,70   | <b>15</b>      | 39,70   | <b>21</b>      | 42,10   | <b>27</b>      | 43,40   |
| <b>4</b>       | 30,50  | <b>10</b>      | 29,10   | <b>16</b>      | 43,20   | <b>22</b>      | 40,80   | <b>28</b>      | 43,30   |
| <b>5</b>       | 28,40  | <b>11</b>      | 35,50   | <b>17</b>      | 44,40   | <b>23</b>      | 44,30   | <b>29</b>      | 50,60   |
| <b>6</b>       | 26,60  | <b>12</b>      | 37,10   | <b>18</b>      | 43,60   | <b>24</b>      | 41,80   | <b>30</b>      | 42,90   |
| <b>média</b>   | 27,77  | <b>média</b>   | 34,00   | <b>média</b>   | 40,77   | <b>média</b>   | 41,32   | <b>média</b>   | 44,78   |
| <b>desvpad</b> | 1,54   | <b>desvpad</b> | 3,29    | <b>desvpad</b> | 3,51    | <b>desvpad</b> | 2,22    | <b>desvpad</b> | 2,90    |
| <b>C.V.</b>    | 5,54   | <b>C.V.</b>    | 9,69    | <b>C.V.</b>    | 8,61    | <b>C.V.</b>    | 5,37    | <b>C.V.</b>    | 6,48    |
| <b>%</b>       | 68,11  | <b>%</b>       | 83,39   | <b>%</b>       | 100,00  | <b>%</b>       | 101,34  | <b>%</b>       | 109,84  |

Desvpad: desvio padrão; C.V.: Coeficiente de variação e %: Porcentagem com relação ao 28dias do REF.

**Resistência à compressão BCP-PJ5**

| PJ5            | 7 dias | PJ5            | 14 dias | PJ5            | 28 dias | PJ5            | 60 dias | PJ5            | 90 dias |
|----------------|--------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
|                | 03/abr |                | 10/abr  |                | 24/abr  |                | 26/mai  |                | 26/jun  |
|                | MPa    |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |
| <b>1</b>       | 29,40  | <b>7</b>       | 36,00   | <b>13</b>      | 42,60   | <b>19</b>      | 45,00   | <b>25</b>      | 44,5    |
| <b>2</b>       | 30,20  | <b>8</b>       | 40,80   | <b>14</b>      | 43,70   | <b>20</b>      | 41,00   | <b>26</b>      | 49,8    |
| <b>3</b>       | 32,10  | <b>9</b>       | 42,90   | <b>15</b>      | 42,60   | <b>21</b>      | 37,30   | <b>27</b>      | 45,5    |
| <b>4</b>       | 32,10  | <b>10</b>      | 42,70   | <b>16</b>      | 42,60   | <b>22</b>      | 45,80   | <b>28</b>      | 45,5    |
| <b>5</b>       | 36,00  | <b>11</b>      | 44,20   | <b>17</b>      | 43,40   | <b>23</b>      | 55,60   | <b>29</b>      | 48,8    |
| <b>6</b>       | 32,70  | <b>12</b>      | 44,50   | <b>18</b>      | 40,70   | <b>24</b>      | 50,00   | <b>30</b>      | 46,9    |
| <b>média</b>   | 32,08  | <b>média</b>   | 41,85   | <b>média</b>   | 42,60   | <b>média</b>   | 45,78   | <b>média</b>   | 46,83   |
| <b>desvpad</b> | 2,30   | <b>desvpad</b> | 3,15    | <b>desvpad</b> | 1,04    | <b>desvpad</b> | 6,47    | <b>desvpad</b> | 2,08    |
| <b>C.V.</b>    | 7,17   | <b>C.V.</b>    | 7,53    | <b>C.V.</b>    | 2,45    | <b>C.V.</b>    | 14,14   | <b>C.V.</b>    | 4,45    |
| <b>%</b>       | 78,69  | <b>%</b>       | 102,65  | <b>%</b>       | 104,49  | <b>%</b>       | 112,30  | <b>%</b>       | 114,87  |

Desvpad: desvio padrão; C.V.: Coeficiente de variação e %: Porcentagem com relação ao 28dias do REF.



**Resistência à compressão BCP-PJ10**

| PJ10           | 7 dias | PJ10           | 14 dias | PJ10           | 28 dias | PJ10           | 60 dias | PJ10           | 90 dias |
|----------------|--------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
|                | 03/abr |                | 10/abr  |                | 24/abr  |                | 26/mai  |                | 26/jun  |
|                | MPa    |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |
| <b>1</b>       | 28,90  | <b>7</b>       | 32,70   | <b>13</b>      | 40,50   | <b>19</b>      | 34,60   | <b>25</b>      | 36,00   |
| <b>2</b>       | 27,30  | <b>8</b>       | 32,90   | <b>14</b>      | 38,50   | <b>20</b>      | 31,70   | <b>26</b>      | 38,90   |
| <b>3</b>       | 29,20  | <b>9</b>       | 29,80   | <b>15</b>      | 33,50   | <b>21</b>      | 35,30   | <b>27</b>      | 36,90   |
| <b>4</b>       | 28,60  | <b>10</b>      | 19,70   | <b>16</b>      | 38,90   | <b>22</b>      | 39,10   | <b>28</b>      | 39,20   |
| <b>5</b>       | 29,10  | <b>11</b>      | 17,70   | <b>17</b>      | 40,50   | <b>23</b>      | 42,60   | <b>29</b>      | 36,00   |
| <b>6</b>       | 29,20  | <b>12</b>      | 15,40   | <b>18</b>      | 33,50   | <b>24</b>      | 36,2    | <b>30</b>      | 39,5    |
| <b>média</b>   | 28,72  | <b>média</b>   | 24,70   | <b>média</b>   | 37,57   | <b>média</b>   | 36,58   | <b>média</b>   | 37,75   |
| <b>desvpad</b> | 0,73   | <b>desvpad</b> | 7,97    | <b>desvpad</b> | 3,25    | <b>desvpad</b> | 3,80    | <b>desvpad</b> | 1,63    |
| <b>C.V.</b>    | 2,54   | <b>C.V.</b>    | 32,27   | <b>C.V.</b>    | 8,66    | <b>C.V.</b>    | 10,38   | <b>C.V.</b>    | 4,33    |
| <b>%</b>       | 70,44  | <b>%</b>       | 60,58   | <b>%</b>       | 92,14   | <b>%</b>       | 89,73   | <b>%</b>       | 92,59   |

Desvpad: desvio padrão; C.V.: Coeficiente de variação e %: Porcentagem com relação ao 28dias do REF.

**Resistência à compressão BCP-PJ15**

| PJ15           | 7 dias | PJ15           | 14 dias | PJ15           | 28 dias | PJ15           | 60 dias | PJ15           | 90 dias |
|----------------|--------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
|                | 03/abr |                | 10/abr  |                | 24/abr  |                | 26/mai  |                | 26/jun  |
|                | MPa    |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |
| <b>1</b>       | 27,80  | <b>7</b>       | 26,20   | <b>13</b>      | 35,30   | <b>19</b>      | 39,20   | <b>25</b>      | 41,80   |
| <b>2</b>       | 26,30  | <b>8</b>       | 30,70   | <b>14</b>      | 36,40   | <b>20</b>      | 36,80   | <b>26</b>      | 37,90   |
| <b>3</b>       | 29,80  | <b>9</b>       | 28,40   | <b>15</b>      | 35,10   | <b>21</b>      | 31,70   | <b>27</b>      | 39,10   |
| <b>4</b>       | 19,10  | <b>10</b>      | 21,50   | <b>16</b>      | 34,70   | <b>22</b>      | 39,10   | <b>28</b>      | 35,30   |
| <b>5</b>       | 21,70  | <b>11</b>      | 20,70   | <b>17</b>      | 29,50   | <b>23</b>      | 41,10   | <b>29</b>      | 40,70   |
| <b>6</b>       | 23,90  | <b>12</b>      | 20,60   | <b>18</b>      | 29,10   | <b>24</b>      | 37,50   | <b>30</b>      | 37,20   |
| <b>média</b>   | 24,77  | <b>média</b>   | 24,68   | <b>média</b>   | 33,35   | <b>média</b>   | 37,57   | <b>média</b>   | 38,67   |
| <b>desvpad</b> | 3,98   | <b>desvpad</b> | 4,36    | <b>desvpad</b> | 3,19    | <b>desvpad</b> | 3,24    | <b>desvpad</b> | 2,38    |
| <b>C.V.</b>    | 16,07  | <b>C.V.</b>    | 17,66   | <b>C.V.</b>    | 9,56    | <b>C.V.</b>    | 8,63    | <b>C.V.</b>    | 6,14    |
| <b>%</b>       | 60,75  | <b>%</b>       | 60,54   | <b>%</b>       | 81,80   | <b>%</b>       | 92,14   | <b>%</b>       | 94,84   |

Desvpad: desvio padrão; C.V.: Coeficiente de variação e %: Porcentagem com relação ao 28dias do REF.

### Resistência à compressão BCP-PJ20

| PJ20           | 7 dias | PJ20           | 14 dias | PJ20           | 28 dias | PJ20           | 60 dias | PJ20           | 90 dias |
|----------------|--------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
|                | 03/abr |                | 10/abr  |                | 24/abr  |                | 26/mai  |                | 26/jun  |
|                | MPa    |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |
| <b>1</b>       | 24,20  | <b>7</b>       | 17,0    | <b>13</b>      | 34,0    | <b>19</b>      | 30,20   | <b>25</b>      | 28,10   |
| <b>2</b>       | 17,50  | <b>8</b>       | 22,8    | <b>14</b>      | 34,3    | <b>20</b>      | 27,30   | <b>26</b>      | 24,80   |
| <b>3</b>       | 21,50  | <b>9</b>       | 16,7    | <b>15</b>      | 30,8    | <b>21</b>      | 28,80   | <b>27</b>      | 35,00   |
| <b>4</b>       | 15,70  | <b>10</b>      | 22,3    | <b>16</b>      | 38,4    | <b>22</b>      | 34,60   | <b>28</b>      | 29,20   |
| <b>5</b>       | 21,00  | <b>11</b>      | 25,9    | <b>17</b>      | 32,0    | <b>23</b>      | 32,40   | <b>29</b>      | 32,20   |
| <b>6</b>       | 24,70  | <b>12</b>      | 15,4    | <b>18</b>      | 35,8    | <b>24</b>      | 31,70   | <b>30</b>      | 23,60   |
| <b>média</b>   | 20,77  | <b>média</b>   | 20,02   | <b>média</b>   | 34,2    | <b>média</b>   | 30,83   | <b>média</b>   | 28,82   |
| <b>desvpad</b> | 3,58   | <b>desvpad</b> | 4,22    | <b>desvpad</b> | 2,71    | <b>desvpad</b> | 2,62    | <b>desvpad</b> | 4,33    |
| <b>C.V.</b>    | 17,25  | <b>C.V.</b>    | 21,08   | <b>C.V.</b>    | 7,91    | <b>C.V.</b>    | 8,51    | <b>C.V.</b>    | 15,02   |
| <b>%</b>       | 50,94  | <b>%</b>       | 49,10   | <b>%</b>       | 83,93   | <b>%</b>       | 75,63   | <b>%</b>       | 70,68   |

Desvpad: desvio padrão; C.V.: Coeficiente de variação e %: Porcentagem com relação ao 28dias do REF.

### Resistência à compressão BCP-PJ25

| PJ25           | 7 dias | PJ25           | 14 dias | PJ25           | 28 dias | PJ25           | 60 dias | PJ25           | 90 dias |
|----------------|--------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
|                | 03/abr |                | 10/abr  |                | 24/abr  |                | 26/mai  |                | 26/jun  |
|                | MPa    |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |
| <b>1</b>       | 24,30  | <b>7</b>       | 28,20   | <b>13</b>      | 25,20   | <b>19</b>      | 28,90   | <b>25</b>      | 44,0    |
| <b>2</b>       | 24,90  | <b>8</b>       | 24,90   | <b>14</b>      | 29,90   | <b>20</b>      | 32,80   | <b>26</b>      | 41,5    |
| <b>3</b>       | 30,20  | <b>9</b>       | 24,10   | <b>15</b>      | 31,30   | <b>21</b>      | 33,30   | <b>27</b>      | 41,1    |
| <b>4</b>       | 24,10  | <b>10</b>      | 16,20   | <b>16</b>      | 27,90   | <b>22</b>      | 27,60   | <b>28</b>      | 31,7    |
| <b>5</b>       | 22,70  | <b>11</b>      | 17,50   | <b>17</b>      | 28,10   | <b>23</b>      | 22,60   | <b>29</b>      | 34,2    |
| <b>6</b>       | 23,70  | <b>12</b>      | 15,70   | <b>18</b>      | 25,00   | <b>24</b>      | 23,40   | <b>30</b>      | 33,7    |
| <b>média</b>   | 24,98  | <b>média</b>   | 21,10   | <b>média</b>   | 27,90   | <b>média</b>   | 28,10   | <b>média</b>   | 37,70   |
| <b>desvpad</b> | 2,66   | <b>desvpad</b> | 5,29    | <b>desvpad</b> | 2,50    | <b>desvpad</b> | 4,52    | <b>desvpad</b> | 5,10    |
| <b>C.V.</b>    | 10,64  | <b>C.V.</b>    | 25,08   | <b>C.V.</b>    | 8,97    | <b>C.V.</b>    | 16,10   | <b>C.V.</b>    | 13,52   |
| <b>%</b>       | 61,28  | <b>%</b>       | 51,75   | <b>%</b>       | 68,43   | <b>%</b>       | 68,92   | <b>%</b>       | 92,47   |

Desvpad: desvio padrão; C.V.: Coeficiente de variação e %: Porcentagem com relação ao 28dias do REF.

**APÊNDICE 5: VALORES DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO PARA OS  
BLOCOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR LODO DE  
GALVANOPLASTIA**

### Resistência à compressão BCP-REF

| CP             | 7 dias | CP             | 14 dias | CP             | 28 dias | CP             | 60 dias | CP             | 90 dias |
|----------------|--------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
|                | 18/out |                | 25/out  |                | 08/nov  |                | 10/dez  |                | 10/jan  |
|                | MPa    |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |
| <b>1</b>       | 28,20  | <b>7</b>       | 38,20   | <b>13</b>      | 37,50   | <b>19</b>      | 34,60   | <b>25</b>      | 33,30   |
| <b>2</b>       | 32,40  | <b>8</b>       | 36,00   | <b>14</b>      | 38,70   | <b>20</b>      | 36,90   | <b>26</b>      | 41,60   |
| <b>3</b>       | 28,10  | <b>9</b>       | 33,10   | <b>15</b>      | 34,50   | <b>21</b>      | 41,50   | <b>27</b>      | 39,50   |
| <b>4</b>       | 37,10  | <b>10</b>      | 33,30   | <b>16</b>      | 38,00   | <b>22</b>      | 43,20   | <b>28</b>      | 37,50   |
| <b>5</b>       | 37,20  | <b>11</b>      | 41,60   | <b>17</b>      | 35,70   | <b>23</b>      | 39,30   | <b>29</b>      | 35,30   |
| <b>6</b>       | 34,60  | <b>12</b>      | 39,50   | <b>18</b>      | 39,70   | <b>24</b>      | 41,60   | <b>30</b>      | 37,50   |
| <b>média</b>   | 32,93  | <b>média</b>   | 36,95   | <b>média</b>   | 37,35   | <b>média</b>   | 39,52   | <b>média</b>   | 37,45   |
| <b>desvpad</b> | 4,11   | <b>desvpad</b> | 3,43    | <b>desvpad</b> | 1,93    | <b>desvpad</b> | 3,25    | <b>desvpad</b> | 2,94    |
| <b>C.V.</b>    | 12,47  | <b>C.V.</b>    | 9,28    | <b>C.V.</b>    | 5,17    | <b>C.V.</b>    | 8,23    | <b>C.V.</b>    | 7,86    |
| <b>%</b>       | 88,17  | <b>%</b>       | 98,93   | <b>%</b>       | 100,00  | <b>%</b>       | 105,80  | <b>%</b>       | 100,27  |

Desvpad: desvio padrão; C.V.: Coeficiente de variação e %: Porcentagem com relação ao 28dias do REF.

### Resistência à compressão BCP-LG5

| CP             | 7 dias | CP             | 14 dias | CP             | 28 dias | CP             | 60 dias | CP             | 90 dias |
|----------------|--------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
|                | 18/out |                | 25/out  |                | 08/nov  |                | 10/dez  |                | 10/jan  |
|                | MPa    |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |
| <b>1</b>       | 25,90  | <b>7</b>       | 39,70   | <b>13</b>      | 35,80   | <b>19</b>      | 38,20   | <b>25</b>      | 28,10   |
| <b>2</b>       | 22,70  | <b>8</b>       | 40,80   | <b>14</b>      | 36,80   | <b>20</b>      | 30,00   | <b>26</b>      | 36,00   |
| <b>3</b>       | 23,40  | <b>9</b>       | 27,30   | <b>15</b>      | 37,40   | <b>21</b>      | 40,00   | <b>27</b>      | 42,70   |
| <b>4</b>       | 28,60  | <b>10</b>      | 29,40   | <b>16</b>      | 39,10   | <b>22</b>      | 29,70   | <b>28</b>      | 28,80   |
| <b>5</b>       | 30,70  | <b>11</b>      | 36,00   | <b>17</b>      | 34,90   | <b>23</b>      | 30,70   | <b>29</b>      | 32,90   |
| <b>6</b>       | 36,00  | <b>12</b>      | 42,70   | <b>18</b>      | 28,60   | <b>24</b>      | 31,40   | <b>30</b>      | 31,30   |
| <b>média</b>   | 27,88  | <b>média</b>   | 35,98   | <b>média</b>   | 35,43   | <b>média</b>   | 33,33   | <b>média</b>   | 33,30   |
| <b>desvpad</b> | 5,00   | <b>desvpad</b> | 6,34    | <b>desvpad</b> | 3,64    | <b>desvpad</b> | 4,54    | <b>desvpad</b> | 5,42    |
| <b>C.V.</b>    | 17,95  | <b>C.V.</b>    | 17,61   | <b>C.V.</b>    | 10,28   | <b>C.V.</b>    | 13,62   | <b>C.V.</b>    | 16,29   |
| <b>%</b>       | 74,65  | <b>%</b>       | 96,34   | <b>%</b>       | 94,87   | <b>%</b>       | 89,25   | <b>%</b>       | 89,16   |

Desvpad: desvio padrão; C.V.: Coeficiente de variação e %: Porcentagem com relação ao 28dias do REF.

**Resistência à compressão BCP-LG10**

| CP             | 7 dias | CP             | 14 dias | CP             | 28 dias | CP             | 60 dias | CP             | 90 dias |
|----------------|--------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
|                | 18/out |                | 25/out  |                | 08/nov  |                | 10/dez  |                | 10/jan  |
|                | MPa    |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |
| <b>1</b>       | 22,00  | <b>7</b>       | 27,30   | <b>13</b>      | 17,10   | <b>19</b>      | 27,70   | <b>25</b>      | 15,00   |
| <b>2</b>       | 18,60  | <b>8</b>       | 29,20   | <b>14</b>      | 25,50   | <b>20</b>      | 31,80   | <b>26</b>      | 23,10   |
| <b>3</b>       | 31,70  | <b>9</b>       | 15,20   | <b>15</b>      | 31,00   | <b>21</b>      | 29,20   | <b>27</b>      | 25,00   |
| <b>4</b>       | 26,30  | <b>10</b>      | 16,00   | <b>16</b>      | 28,50   | <b>22</b>      | 31,30   | <b>28</b>      | 17,30   |
| <b>5</b>       | 33,30  | <b>11</b>      | 27,60   | <b>17</b>      | 29,70   | <b>23</b>      | 32,60   | <b>29</b>      | 21,50   |
| <b>6</b>       | 24,10  | <b>12</b>      | 25,00   | <b>18</b>      | 28,80   | <b>24</b>      | 30,60   | <b>30</b>      | 16,90   |
| <b>média</b>   | 26,00  | <b>média</b>   | 23,38   | <b>média</b>   | 26,77   | <b>média</b>   | 30,53   | <b>média</b>   | 19,80   |
| <b>desvpad</b> | 5,66   | <b>desvpad</b> | 6,18    | <b>desvpad</b> | 5,07    | <b>desvpad</b> | 1,80    | <b>desvpad</b> | 3,96    |
| <b>C.V.</b>    | 21,77  | <b>C.V.</b>    | 26,44   | <b>C.V.</b>    | 18,96   | <b>C.V.</b>    | 5,91    | <b>C.V.</b>    | 20,01   |
| <b>%</b>       | 69,61  | <b>%</b>       | 62,61   | <b>%</b>       | 71,66   | <b>%</b>       | 81,75   | <b>%</b>       | 53,01   |

Desvpad: desvio padrão; C.V.: Coeficiente de variação e %: Porcentagem com relação ao 28dias do REF.

**Resistência à compressão BCP-LG15**

| CP             | 7 dias | CP             | 14 dias | CP             | 28 dias | CP             | 60 dias | CP             | 90 dias |
|----------------|--------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
|                | 18/out |                | 25/out  |                | 08/nov  |                | 10/dez  |                | 10/jan  |
|                | MPa    |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |
| <b>1</b>       | 22,60  | <b>7</b>       | 26,40   | <b>13</b>      | 19,70   | <b>19</b>      | 25,20   | <b>25</b>      | 32,60   |
| <b>2</b>       | 21,10  | <b>8</b>       | 21,30   | <b>14</b>      | 19,00   | <b>20</b>      | 24,80   | <b>26</b>      | 29,60   |
| <b>3</b>       | 24,40  | <b>9</b>       | 22,30   | <b>15</b>      | 23,40   | <b>21</b>      | 21,00   | <b>27</b>      | 24,00   |
| <b>4</b>       | 26,30  | <b>10</b>      | 24,10   | <b>16</b>      | 24,60   | <b>22</b>      | 30,20   | <b>28</b>      | 22,80   |
| <b>5</b>       | 26,80  | <b>11</b>      | 24,60   | <b>17</b>      | 22,60   | <b>23</b>      | 30,70   | <b>29</b>      | 29,20   |
| <b>6</b>       | 27,30  | <b>12</b>      | 22,8    | <b>18</b>      | 19,9    | <b>24</b>      | 23,40   | <b>30</b>      | 30,20   |
| <b>média</b>   | 24,75  | <b>média</b>   | 23,58   | <b>média</b>   | 21,53   | <b>média</b>   | 25,88   | <b>média</b>   | 28,07   |
| <b>desvpad</b> | 2,50   | <b>desvpad</b> | 1,83    | <b>desvpad</b> | 2,30    | <b>desvpad</b> | 3,83    | <b>desvpad</b> | 3,82    |
| <b>C.V.</b>    | 10,09  | <b>C.V.</b>    | 7,75    | <b>C.V.</b>    | 10,69   | <b>C.V.</b>    | 14,81   | <b>C.V.</b>    | 13,62   |
| <b>%</b>       | 66,27  | <b>%</b>       | 63,14   | <b>%</b>       | 57,65   | <b>%</b>       | 69,30   | <b>%</b>       | 75,15   |

Desvpad: desvio padrão; C.V.: Coeficiente de variação e %: Porcentagem com relação ao 28dias do REF.

### Resistência à compressão BCP-LG 20

| CP             | 7 dias | CP             | 14 dias | CP             | 28 dias | CP             | 60 dias | CP             | 90 dias |
|----------------|--------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
|                | 18/out |                | 25/out  |                | 08/nov  |                | 10/dez  |                | 10/jan  |
|                | MPa    |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |
| <b>1</b>       | 15,60  | <b>7</b>       | 21,80   | <b>13</b>      | 20,40   | <b>19</b>      | 22,30   | <b>25</b>      | 24,60   |
| <b>2</b>       | 15,70  | <b>8</b>       | 21,30   | <b>14</b>      | 20,10   | <b>20</b>      | 19,70   | <b>26</b>      | 25,90   |
| <b>3</b>       | 16,10  | <b>9</b>       | 23,70   | <b>15</b>      | 20,10   | <b>21</b>      | 18,30   | <b>27</b>      | 19,80   |
| <b>4</b>       | 13,20  | <b>10</b>      | 19,80   | <b>16</b>      | 22,30   | <b>22</b>      | 13,90   | <b>28</b>      | 23,60   |
| <b>5</b>       | 19,10  | <b>11</b>      | 25,90   | <b>17</b>      | 26,10   | <b>23</b>      | 26,20   | <b>29</b>      | 27,50   |
| <b>6</b>       | 16,80  | <b>12</b>      | 24,40   | <b>18</b>      | 24,40   | <b>24</b>      | 22,60   | <b>30</b>      | 19,90   |
| <b>média</b>   | 16,08  | <b>média</b>   | 22,82   | <b>média</b>   | 22,23   | <b>média</b>   | 20,50   | <b>média</b>   | 23,55   |
| <b>desvpad</b> | 1,91   | <b>desvpad</b> | 2,25    | <b>desvpad</b> | 2,53    | <b>desvpad</b> | 4,22    | <b>desvpad</b> | 3,15    |
| <b>C.V.</b>    | 11,90  | <b>C.V.</b>    | 9,84    | <b>C.V.</b>    | 11,40   | <b>C.V.</b>    | 20,60   | <b>C.V.</b>    | 13,38   |
| <b>%</b>       | 43,06  | <b>%</b>       | 61,09   | <b>%</b>       | 59,53   | <b>%</b>       | 54,89   | <b>%</b>       | 63,05   |

Desvpad: desvio padrão; C.V.: Coeficiente de variação e %: Porcentagem com relação ao 28dias do REF.

### Resistência à compressão BCP-LG25

| CP             | 7 dias | CP             | 14 dias | CP             | 28 dias | CP             | 60 dias | CP             | 90 dias |
|----------------|--------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
|                | 18/out |                | 25/out  |                | 08/nov  |                | 10/dez  |                | 10/jan  |
|                | MPa    |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |                | MPa     |
| <b>1</b>       | 18,40  | <b>7</b>       | 20,40   | <b>13</b>      | 23,00   | <b>19</b>      | 24,10   | <b>25</b>      | 17,20   |
| <b>2</b>       | 17,60  | <b>8</b>       | 24,10   | <b>14</b>      | 21,90   | <b>20</b>      | 27,00   | <b>26</b>      | 19,40   |
| <b>3</b>       | 18,10  | <b>9</b>       | 22,60   | <b>15</b>      | 26,00   | <b>21</b>      | 31,00   | <b>27</b>      | 20,20   |
| <b>4</b>       | 11,80  | <b>10</b>      | 17,20   | <b>16</b>      | 24,10   | <b>22</b>      | 25,20   | <b>28</b>      | 16,50   |
| <b>5</b>       | 14,30  | <b>11</b>      | 19,40   | <b>17</b>      | 22,40   | <b>23</b>      | 26,60   | <b>29</b>      | 17,60   |
| <b>6</b>       | 13,60  | <b>12</b>      | 20,20   | <b>18</b>      | 22,80   | <b>24</b>      | 24,20   | <b>30</b>      | 20,10   |
| <b>média</b>   | 15,63  | <b>média</b>   | 20,65   | <b>média</b>   | 23,37   | <b>média</b>   | 26,35   | <b>média</b>   | 18,50   |
| <b>desvpad</b> | 2,76   | <b>desvpad</b> | 2,43    | <b>desvpad</b> | 1,48    | <b>desvpad</b> | 2,57    | <b>desvpad</b> | 1,60    |
| <b>C.V.</b>    | 17,68  | <b>C.V.</b>    | 11,75   | <b>C.V.</b>    | 6,35    | <b>C.V.</b>    | 9,77    | <b>C.V.</b>    | 8,64    |
| <b>%</b>       | 41,86  | <b>%</b>       | 55,29   | <b>%</b>       | 62,56   | <b>%</b>       | 70,55   | <b>%</b>       | 49,53   |

Desvpad: desvio padrão; C.V.: Coeficiente de variação e %: Porcentagem com relação ao 28dias do REF.

**APÊNDICE 6: VALORES DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO PARA  
AMOSTRAS DE BCP-PJ EM TODAS AS IDADES DE CURA**

### Resultados de lixiviação para BCP-PJ aos 7 dias de cura

| Parâmetros  | REF   | PJ5   | PJ10  | PJ15  | PJ20  | PJ25  | Anexo F<br>(NBR<br>10004/2004) |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|
| Arsênio     | 1,14  | 1,12  | 1,14  | 1,16  | 0,86  | 0,78  | 1,00                           |
| Bário       | 15,90 | 15,47 | 17,55 | 16,92 | 16,80 | 13,21 | 70,00                          |
| Cádmio      | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,03  | 0,02  | 0,02  | 0,50                           |
| Chumbo      | 0,32  | 0,37  | 0,37  | 0,38  | 0,35  | 0,28  | 1,00                           |
| Cromo Total | 0,19  | 0,12  | 0,12  | 0,12  | 0,18  | 0,19  | 5,00                           |
| Mercúrio    | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,10                           |
| Fluoreto    | 0,40  | n.d   | n.d   | n.d   | n.d   | n.d   | 150,00                         |
| Prata       | 0,02  | 0,08  | 0,02  | 0,03  | 0,02  | 0,04  | 5,00                           |
| Selênio     | 0,68  | 0,82  | 0,71  | 0,30  | 0,07  | 0,18  | 1,00                           |

### Resultados de solubilização para BCP-PJ aos 7 dias de cura

| Parâmetros  | REF   | PJ5   | PJ10  | PJ15  | PJ20  | PJ25  | Anexo G<br>(NBR<br>10004/2004) |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|
| Alumínio    | 0,30  | 0,31  | 0,33  | 0,37  | 0,41  | 0,40  | 0,20                           |
| Arsênio     | 0,86  | 1,03  | 0,96  | 0,99  | 0,92  | 0,96  | 0,01                           |
| Bário       | 3,35  | 3,48  | 3,42  | 4,83  | 1,90  | 3,37  | 0,70                           |
| Cádmio      | 0,01  | 0,00  | 0,00  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01                           |
| Chumbo      | 0,19  | 0,18  | 0,19  | 0,20  | 0,20  | 0,20  | 0,01                           |
| Cobre       | 0,05  | 0,04  | 0,05  | 0,06  | 0,07  | 0,07  | 2,00                           |
| Cromo total | 0,02  | 0,03  | 0,02  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,05                           |
| Ferro       | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,30                           |
| Manganês    | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,10                           |
| Mercúrio    | 0,03  | 0,01  | 0,02  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,001                          |
| Prata       | 0,02  | 0,03  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,05                           |
| Selênio     | 0,70  | 0,72  | 0,71  | 0,65  | 0,73  | 0,69  | 0,01                           |
| Sódio       | 43,48 | 41,12 | 42,30 | 32,78 | 29,65 | 31,21 | 200,00                         |
| Zinco       | 0,05  | 0,04  | 0,05  | 0,04  | 0,03  | 0,04  | 5,00                           |



**Resultados de lixiviação para BCP-PJ aos 14 dias de cura**

| <b>Parâmetros</b> | <b>REF</b> | <b>PJ5</b> | <b>PJ10</b> | <b>PJ15</b> | <b>PJ20</b> | <b>PJ25</b> | <b>Anexo F<br/>(NBR<br/>10004/2004)</b> |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Arsênio           | 0,98       | 1,03       | 0,84        | 1,04        | 0,99        | 0,94        | <b>1,00</b>                             |
| Bário             | 5,93       | 7,16       | 5,79        | 6,25        | 6,79        | 9,42        | <b>70,00</b>                            |
| Cádmio            | 0,02       | 0,03       | 0,03        | 0,03        | 0,03        | 0,03        | <b>0,50</b>                             |
| Chumbo            | 0,29       | 0,33       | 0,33        | 0,32        | 0,32        | 0,34        | <b>1,00</b>                             |
| Cromo Total       | 0,11       | 0,10       | 0,10        | 0,11        | 0,10        | 0,10        | <b>5,00</b>                             |
| Mercúrio          | 0,01       | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | n.d         | <b>0,10</b>                             |
| Prata             | 0,04       | 0,04       | 0,04        | 0,04        | 0,05        | 0,05        | <b>5,00</b>                             |
| Selênio           | 0,68       | 0,62       | 0,92        | 1,00        | 1,11        | 0,28        | <b>1,00</b>                             |

**Resultados de solubilização para BCP-PJ aos 14 dias de cura**

| <b>Parâmetros</b> | <b>CP</b> | <b>PJ5</b> | <b>PJ10</b> | <b>PJ15</b> | <b>PJ20</b> | <b>PJ25</b> | <b>Anexo G<br/>(NBR<br/>10004/2004)</b> |
|-------------------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Alumínio          | 0,13      | 0,13       | 0,18        | 0,15        | 0,10        | 0,04        | <b>0,20</b>                             |
| Arsênio           | 0,74      | 0,69       | 0,70        | 0,65        | 0,87        | 0,89        | <b>0,01</b>                             |
| Bário             | 9,74      | 10,54      | 9,22        | 9,30        | 9,50        | 8,71        | <b>0,70</b>                             |
| Cádmio            | 0,01      | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,01</b>                             |
| Chumbo            | 0,13      | 0,13       | 0,12        | 0,12        | 0,11        | 0,11        | <b>0,01</b>                             |
| Cobre             | 0,08      | 0,08       | 0,10        | 0,09        | 0,10        | 0,13        | <b>2,00</b>                             |
| Cromo total       | 0,03      | 0,03       | 0,03        | 0,03        | 0,02        | 0,03        | <b>0,05</b>                             |
| Ferro             | 0,03      | 0,03       | 0,03        | 0,06        | 0,04        | 0,04        | <b>0,30</b>                             |
| Manganês          | 0,02      | 0,02       | 0,01        | 0,02        | 0,01        | 0,01        | <b>0,10</b>                             |
| Mercúrio          | n.d       | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>0,001</b>                            |
| Prata             | 0,02      | 0,02       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,05</b>                             |
| Selênio           | 0,63      | 0,76       | 0,66        | 0,63        | 1,06        | 1,03        | <b>0,01</b>                             |
| Sódio             | 19,49     | 21,25      | 38,12       | 38,28       | 32,87       | 44,05       | <b>200,00</b>                           |
| Zinco             | 0,02      | 0,03       | 0,04        | 0,05        | 0,03        | 0,05        | <b>5,00</b>                             |

**Resultados de lixiviação para BCP-PJ aos 60 dias de cura**

| <b>Parâmetros</b> | <b>REF</b> | <b>PJ5</b> | <b>PJ10</b> | <b>PJ15</b> | <b>PJ20</b> | <b>PJ25</b> | <b>Anexo F<br/>(NBR<br/>10004/2004)</b> |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Arsênio           | 0,87       | 0,98       | 1,08        | 0,96        | 0,82        | 0,96        | <b>1,00</b>                             |
| Bário             | 41,13      | 41,53      | 38,13       | 41,10       | 43,87       | 45,96       | <b>70,00</b>                            |
| Cádmio            | 0,03       | 0,03       | 0,03        | 0,03        | 0,03        | 0,03        | <b>0,50</b>                             |
| Chumbo            | 0,28       | 0,25       | 0,24        | 0,25        | 0,25        | 0,24        | <b>1,00</b>                             |
| Cromo Total       | 0,19       | 0,17       | 0,16        | 0,17        | 0,20        | 0,13        | <b>5,00</b>                             |
| Mercúrio          | n.d        | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>0,10</b>                             |
| Prata             | 0,03       | 0,03       | 0,03        | 0,02        | 0,03        | 0,03        | <b>5,00</b>                             |
| Selênio           | 1,04       | 1,10       | 1,08        | 1,09        | 0,71        | 0,77        | <b>1,00</b>                             |

**Resultados de solubilização para BCP-PJ aos 60 dias de cura**

| <b>Parâmetros</b> | <b>CP</b> | <b>PJ5</b> | <b>PJ10</b> | <b>PJ15</b> | <b>PJ20</b> | <b>PJ25</b> | <b>Anexo G<br/>(NBR<br/>10004/2004)</b> |
|-------------------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Alumínio          | 0,24      | 0,31       | 0,32        | 0,24        | 0,25        | 0,31        | <b>0,20</b>                             |
| Arsênio           | 0,62      | 0,53       | 0,68        | 0,73        | 0,72        | 0,76        | <b>0,01</b>                             |
| Bário             | 9,51      | 9,74       | 8,14        | 8,24        | 8,32        | 8,67        | <b>0,70</b>                             |
| Cádmio            | 0,01      | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,01</b>                             |
| Chumbo            | 0,17      | 0,12       | 0,09        | 0,09        | 0,12        | 0,08        | <b>0,01</b>                             |
| Cobre             | 0,07      | 0,12       | 0,09        | 0,07        | 0,06        | 0,03        | <b>2,00</b>                             |
| Cromo total       | 0,03      | 0,01       | 0,01        | 0,02        | 0,02        | 0,02        | <b>0,05</b>                             |
| Ferro             | 0,04      | 0,07       | 0,12        | 0,09        | 0,03        | 0,06        | <b>0,30</b>                             |
| Manganês          | 0,01      | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,10</b>                             |
| Mercúrio          | n.d       | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>0,001</b>                            |
| Prata             | 0,01      | 0,02       | 0,03        | 0,03        | 0,03        | 0,03        | <b>0,05</b>                             |
| Selênio           | 0,88      | 0,53       | 0,61        | 0,49        | 0,69        | 0,55        | <b>0,01</b>                             |
| Sódio             | 36,80     | 48,57      | 39,55       | 49,68       | 70,84       | 66,04       | <b>200,00</b>                           |
| Zinco             | 0,01      | 0,04       | 0,04        | 0,02        | 0,03        | 0,03        | <b>5,00</b>                             |

**Resultados de lixiviação para BCP-PJ aos 90 dias de cura**

| <b>Parâmetros</b> | <b>REF</b> | <b>PJ5</b> | <b>PJ10</b> | <b>PJ15</b> | <b>PJ20</b> | <b>PJ25</b> | <b>Anexo F<br/>(NBR<br/>10004/2004)</b> |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Arsênio           | 0,53       | 0,94       | 0,97        | 1,00        | 1,08        | 1,09        | <b>1,00</b>                             |
| Bário             | 33,35      | 31,65      | 33,85       | 35,10       | 34,30       | 30,65       | <b>70,00</b>                            |
| Cádmio            | 0,02       | 0,02       | 0,02        | 0,02        | 0,02        | 0,02        | <b>0,50</b>                             |
| Chumbo            | 0,21       | 0,24       | 0,22        | 0,20        | 0,17        | 0,15        | <b>1,00</b>                             |
| Cromo Total       | 0,14       | 0,14       | 0,16        | 0,17        | 0,18        | 0,10        | <b>5,00</b>                             |
| Mercúrio          | n.d        | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>0,10</b>                             |
| Prata             | 0,03       | 0,03       | 0,03        | 0,03        | 0,03        | 0,03        | <b>5,00</b>                             |
| Selênio           | 1,09       | 0,86       | 0,93        | 1,00        | 0,96        | 1,04        | <b>1,00</b>                             |

**Resultados de solubilização para BCP-PJ aos 90 dias de cura**

| <b>Parâmetros</b> | <b>CP</b> | <b>PJ5</b> | <b>PJ10</b> | <b>PJ15</b> | <b>PJ20</b> | <b>PJ25</b> | <b>Anexo G<br/>(NBR<br/>10004/2004)</b> |
|-------------------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Alumínio          | 0,15      | 0,14       | 0,07        | 0,10        | 0,16        | 0,14        | <b>0,20</b>                             |
| Arsênio           | 0,63      | 0,84       | 0,87        | 0,90        | 0,86        | 0,88        | <b>0,01</b>                             |
| Bário             | 10,54     | 9,22       | 9,30        | 9,57        | 9,80        | 9,50        | <b>0,70</b>                             |
| Cádmio            | 0,01      | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,01</b>                             |
| Chumbo            | 0,12      | 0,15       | 0,09        | 0,11        | 0,11        | 0,08        | <b>0,01</b>                             |
| Cobre             | 0,09      | 0,11       | 0,19        | 0,10        | 0,13        | 1,14        | <b>2,00</b>                             |
| Cromo total       | 0,03      | 0,02       | 0,03        | 0,02        | 0,03        | 0,02        | <b>0,05</b>                             |
| Ferro             | 0,06      | 0,04       | 0,04        | 0,04        | 0,04        | 0,04        | <b>0,30</b>                             |
| Manganês          | 0,02      | 0,00       | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 0,00        | <b>0,10</b>                             |
| Mercúrio          | n.d       | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>0,001</b>                            |
| Prata             | 0,01      | 0,01       | 0,02        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,05</b>                             |
| Selênio           | 0,66      | 0,63       | 0,66        | 1,14        | 1,06        | 1,03        | <b>0,01</b>                             |
| Sódio             | 36,86     | 38,15      | 51,10       | 65,82       | 68,90       | 87,50       | <b>200,00</b>                           |
| Zinco             | 0,04      | 0,03       | 0,03        | 0,04        | 0,03        | 0,03        | <b>5,00</b>                             |

**APÊNDICE 7: VALORES DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO PARA  
AMOSTRAS DE BCP-LG EM TODAS AS IDADES DE CURA**

**Resultados de lixiviação para bcp-lg aos 7 dias de cura**

| <b>Parâmetros</b> | <b>REF</b> | <b>LG5</b> | <b>LG10</b> | <b>LG15</b> | <b>LG20</b> | <b>LG25</b> | <b>Anexo F<br/>(NBR<br/>10004/2004)</b> |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Arsênio           | 1,05       | 1,02       | 1,00        | 0,95        | 1,06        | 0,84        | <b>1,00</b>                             |
| Bário             | 8,10       | 7,33       | 8,14        | 7,82        | 6,94        | 9,09        | <b>70,00</b>                            |
| Cádmio            | 0,03       | 0,03       | 0,03        | 0,03        | 0,03        | 0,03        | <b>0,50</b>                             |
| Chumbo            | 0,38       | 0,37       | 0,37        | 0,36        | 0,32        | 0,16        | <b>1,00</b>                             |
| Cromo Total       | 0,24       | 0,24       | 0,25        | 0,26        | 0,27        | 0,27        | <b>5,00</b>                             |
| Mercúrio          | n.d        | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>0,10</b>                             |
| Prata             | 0,05       | 0,05       | 0,05        | 0,05        | 0,05        | 0,55        | <b>5,00</b>                             |
| Selênio           | 0,52       | 0,52       | 0,53        | 0,53        | 0,30        | 0,25        | <b>1,00</b>                             |

**Resultados de solubilização para BCP-LG aos 7 dias de cura**

| <b>Parâmetros</b> | <b>REF</b> | <b>LG5</b> | <b>LG10</b> | <b>LG15</b> | <b>LG20</b> | <b>LG25</b> | <b>Anexo G<br/>(NBR<br/>10004/2004)</b> |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Alumínio          | 0,05       | 0,11       | 0,14        | 0,33        | 0,32        | 0,32        | <b>0,20</b>                             |
| Arsênio           | 0,54       | 0,59       | 0,64        | 0,56        | 0,59        | 0,55        | <b>0,01</b>                             |
| Bário             | 9,42       | 8,72       | 9,63        | 8,19        | 9,89        | 8,50        | <b>0,70</b>                             |
| Cádmio            | 0,01       | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,01</b>                             |
| Chumbo            | 0,13       | 0,16       | 0,17        | 0,15        | 0,19        | 0,17        | <b>0,01</b>                             |
| Cobre             | 0,06       | 0,09       | 0,10        | 0,07        | 0,05        | 0,07        | <b>2,00</b>                             |
| Cromo total       | 0,04       | 0,03       | 0,04        | 0,03        | 0,04        | 0,04        | <b>0,05</b>                             |
| Ferro             | 0,05       | 0,03       | 0,05        | 0,03        | 0,05        | 0,03        | <b>0,30</b>                             |
| Manganês          | 0,01       | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,10</b>                             |
| Mercúrio          | n.d        | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>0,001</b>                            |
| Prata             | 0,01       | 0,02       | 0,02        | 0,02        | 0,18        | 0,02        | <b>0,05</b>                             |
| Selênio           | 0,85       | 0,71       | 0,89        | 0,93        | 0,90        | 0,86        | <b>0,01</b>                             |
| Sódio             | 51,90      | 45,67      | 69,16       | 74,27       | 112,15      | 129,30      | <b>200,00</b>                           |
| Zinco             | 0,09       | 0,07       | 0,09        | 0,06        | 0,13        | 0,10        | <b>5,00</b>                             |

**Resultados de lixiviação para BCP-LG aos 14 dias de cura**

| <b>Parâmetros</b> | <b>REF</b> | <b>LG5</b> | <b>LG10</b> | <b>LG15</b> | <b>LG20</b> | <b>LG25</b> | <b>Anexo F<br/>(NBR<br/>10004/2004)</b> |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Arsênio           | 0,94       | 0,84       | 0,82        | 0,90        | 1,13        | 1,07        | <b>1,00</b>                             |
| Bário             | 11,11      | 10,41      | 11,29       | 11,20       | 11,54       | 12,17       | <b>70,00</b>                            |
| Cádmio            | 0,03       | 0,03       | 0,03        | 0,03        | 0,03        | 0,03        | <b>0,50</b>                             |
| Chumbo            | 0,21       | 0,23       | 0,25        | 0,29        | 0,28        | 0,26        | <b>1,00</b>                             |
| Cromo Total       | 0,28       | 0,30       | 0,25        | 0,26        | 0,28        | 0,30        | <b>5,00</b>                             |
| Mercúrio          | n.d        | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>0,10</b>                             |
| Prata             | 0,50       | 0,51       | 0,03        | 0,03        | 0,03        | 0,03        | <b>5,00</b>                             |
| Selênio           | 0,41       | 0,58       | 0,42        | 0,32        | 0,30        | 0,34        | <b>1,00</b>                             |

**Resultados de solubilização para BCP-LG aos 14 dias de cura**

| <b>Parâmetros</b> | <b>REF</b> | <b>LG5</b> | <b>LG10</b> | <b>LG15</b> | <b>LG20</b> | <b>LG25</b> | <b>Anexo G<br/>(NBR<br/>10004/2004)</b> |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Alumínio          | 0,25       | 0,31       | 0,15        | 0,22        | 0,25        | 0,34        | <b>0,20</b>                             |
| Arsênio           | 0,57       | 0,58       | 0,71        | 0,74        | 0,67        | 0,79        | <b>0,01</b>                             |
| Bário             | 9,63       | 8,19       | 8,50        | 8,50        | 7,98        | 9,30        | <b>0,70</b>                             |
| Cádmio            | 0,01       | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,01</b>                             |
| Chumbo            | 0,18       | 0,17       | 0,16        | 0,17        | 0,15        | 0,15        | <b>0,01</b>                             |
| Cobre             | 0,06       | 0,07       | 0,10        | 0,07        | 0,14        | 0,17        | <b>2,00</b>                             |
| Cromo total       | 0,04       | 0,04       | 0,02        | 0,02        | 0,02        | 0,02        | <b>0,05</b>                             |
| Ferro             | 0,03       | 0,05       | 0,02        | 0,02        | 0,02        | 0,02        | <b>0,30</b>                             |
| Manganês          | 0,01       | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,10</b>                             |
| Mercúrio          | n.d        | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>0,001</b>                            |
| Prata             | 0,02       | 0,03       | 0,01        | 0,02        | 0,01        | 0,01        | <b>0,05</b>                             |
| Selênio           | 0,75       | 0,85       | 0,56        | 0,58        | 0,39        | 0,48        | <b>0,01</b>                             |
| Sódio             | 27,24      | 49,65      | 63,43       | 62,24       | 69,16       | 87,17       | <b>200,00</b>                           |
| Zinco             | 0,03       | 0,04       | 0,05        | 0,07        | 0,03        | 0,03        | <b>5,00</b>                             |

**Resultados de lixiviação para BCP-LG aos 60 dias de cura**

| <b>Parâmetros</b> | <b>REF</b> | <b>LG5</b> | <b>LG10</b> | <b>LG15</b> | <b>LG20</b> | <b>LG25</b> | <b>Anexo F<br/>(NBR<br/>10004/2004)</b> |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Arsênio           | 0,80       | 0,85       | 0,66        | 0,67        | 0,64        | 0,57        | <b>1,00</b>                             |
| Bário             | 20,90      | 29,10      | 32,25       | 32,45       | 35,00       | 29,30       | <b>70,00</b>                            |
| Cádmio            | 0,02       | 0,02       | 0,02        | 0,02        | 0,02        | 0,02        | <b>0,50</b>                             |
| Chumbo            | 0,22       | 0,22       | 0,20        | 0,19        | 0,18        | 0,16        | <b>1,00</b>                             |
| Cromo Total       | 0,21       | 0,25       | 0,20        | 0,26        | 0,25        | 0,19        | <b>5,00</b>                             |
| Mercúrio          | n.d        | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>0,10</b>                             |
| Prata             | 0,03       | 0,03       | 0,03        | 0,03        | 0,03        | 0,03        | <b>5,00</b>                             |
| Selênio           | 0,44       | 0,31       | 0,27        | 0,23        | 0,15        | 0,46        | <b>1,00</b>                             |

**Resultados de solubilização para BCP-LG aos 60 dias de cura**

| <b>Parâmetros</b> | <b>REF</b> | <b>LG5</b> | <b>LG10</b> | <b>LG15</b> | <b>LG20</b> | <b>LG25</b> | <b>Anexo G<br/>(NBR<br/>10004/2004)</b> |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Alumínio          | 2,23       | 2,64       | 1,70        | 1,50        | 1,70        | 1,03        | <b>0,20</b>                             |
| Arsênio           | 0,80       | 0,87       | 0,82        | 0,63        | 0,69        | 0,64        | <b>0,01</b>                             |
| Bário             | 5,75       | 5,16       | 4,40        | 3,75        | 4,89        | 1,60        | <b>0,70</b>                             |
| Cádmio            | 0,01       | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,06        | <b>0,01</b>                             |
| Chumbo            | 0,07       | 0,08       | 0,07        | 0,09        | 0,05        | 0,09        | <b>0,01</b>                             |
| Cobre             | n.d        | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>2,00</b>                             |
| Cromo total       | 0,02       | 0,03       | 0,01        | 0,02        | 0,01        | 0,01        | <b>0,05</b>                             |
| Ferro             | 0,02       | 0,02       | 0,02        | 0,02        | 0,03        | 0,03        | <b>0,30</b>                             |
| Manganês          | 0,01       | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,10</b>                             |
| Mercúrio          | n.d        | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>0,001</b>                            |
| Prata             | 0,02       | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,02        | <b>0,05</b>                             |
| Selênio           | 1,05       | 0,83       | 0,75        | 1,08        | 1,21        | 1,39        | <b>0,01</b>                             |
| Sódio             | 37,86      | 60,95      | 76,43       | 73,78       | 76,83       | 95,73       | <b>200,00</b>                           |
| Zinco             | 0,03       | 0,03       | 0,03        | 0,05        | 0,03        | 0,04        | <b>5,00</b>                             |

**Resultados de lixiviação para BCP-LG aos 90 dias de cura**

| <b>Parâmetros</b> | <b>REF</b> | <b>LG5</b> | <b>LG10</b> | <b>LG15</b> | <b>LG20</b> | <b>LG25</b> | <b>Anexo F<br/>(NBR<br/>10004/2004)</b> |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Arsênio           | 0,55       | 0,53       | 0,59        | 0,49        | 0,53        | 0,49        | <b>1,00</b>                             |
| Bário             | 11,29      | 11,92      | 11,94       | 12,77       | 11,32       | 11,57       | <b>70,00</b>                            |
| Cádmio            | 0,01       | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,50</b>                             |
| Chumbo            | 0,23       | 0,25       | 0,25        | 0,25        | 0,25        | 0,26        | <b>1,00</b>                             |
| Cromo Total       | 0,21       | 0,22       | 0,25        | 0,27        | 0,29        | 0,34        | <b>5,00</b>                             |
| Mercúrio          | n.d        | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>0,10</b>                             |
| Prata             | 0,02       | 0,00       | 0,01        | 0,01        | 0,02        | 0,02        | <b>5,00</b>                             |

**Resultados de solubilização para BCP-LG aos 90 dias de cura**

| <b>Parâmetros</b> | <b>REF</b> | <b>LG5</b> | <b>LG10</b> | <b>LG15</b> | <b>LG20</b> | <b>LG25</b> | <b>Anexo G<br/>(NBR<br/>10004/2004)</b> |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Alumínio          | 0,20       | 0,20       | 1,26        | 0,20        | 0,15        | 0,20        | <b>0,20</b>                             |
| Arsênio           | 0,51       | 0,49       | 0,58        | 0,50        | 0,50        | 0,50        | <b>0,01</b>                             |
| Bário             | 7,71       | 6,93       | 2,34        | 6,97        | 6,71        | 6,97        | <b>0,70</b>                             |
| Cádmio            | 0,01       | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,01</b>                             |
| Chumbo            | 0,18       | 0,13       | 0,08        | 0,09        | 0,11        | 0,09        | <b>0,01</b>                             |
| Cobre             | n.d        | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>2,00</b>                             |
| Cromo total       | 0,01       | 0,02       | n.d         | 0,03        | 0,01        | 0,03        | <b>0,05</b>                             |
| Ferro             | 0,03       | 0,03       | 0,01        | 0,03        | 0,03        | 0,03        | <b>0,30</b>                             |
| Manganês          | 0,01       | 0,01       | n.d         | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,10</b>                             |
| Mercúrio          | n.d        | n.d        | n.d         | n.d         | n.d         | n.d         | <b>0,001</b>                            |
| Prata             | n.d        | 0,01       | 0,01        | 0,01        | 0,01        | 0,01        | <b>0,05</b>                             |
| Sódio             | 34,26      | 53,67      | 56,18       | 96,03       | 93,55       | 96,03       | <b>200,00</b>                           |
| Zinco             | 0,03       | 0,04       | 0,03        | 0,13        | 0,29        | 0,13        | <b>5,00</b>                             |