

# UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO SÓLIDO INDUSTRIAL NA FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO: ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO, QUÍMICO E MECÂNICO DA MATRIZ CIMENTÍCIA

Juliana Guerra Sgorlon<sup>1</sup> ([julianasgorlon@utfpr.edu.br](mailto:julianasgorlon@utfpr.edu.br)), Renan Felipe Bertoli<sup>2</sup> ([renan\\_bertoli@hotmail.com](mailto:renan_bertoli@hotmail.com)), Maria Carolina Sérgi Gomes<sup>3</sup> ([mariagomes@utfpr.edu.br](mailto:mariagomes@utfpr.edu.br)), Maraisa Lopes Menezes<sup>3</sup> ([maraisal@utfpr.edu.br](mailto:maraisal@utfpr.edu.br))

1 Universidade Tecnológica Federal do Paraná

2 Universidade Estadual e Maringá

3 Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo o reaproveitamento de um resíduo sólido industrial (composto em sua maioria por óxido de magnésio) gerado, sobretudo, por indústrias de galvanoplastia, na fabricação de blocos de concretos para pavimentação. Para a caracterização do resíduo foram feitas as análises de granulometria, fluorescência de raios-x, lixiviação e solubilização. Foram confeccionados blocos com dimensões de 100mm (largura), 200mm (comprimento) e 80mm (altura), utilizando formulações com 2%, 3%, 4%, 5% e 10% de resíduo, na massa de concreto, assim como blocos de referência (sem nenhuma adição de resíduo), para motivo de comparação. Os blocos foram caracterizados por meio dos ensaios de resistência a compressão e absorção de água, bem como foi investigada a eficiência da imobilização do resíduo na matriz cimentícia por meio da técnica de solidificação/estabilização. Os resultados obtidos permitiram classificar o resíduo como não perigoso, não inerte (Classe IIA). Foi verificado que substituições de até 10% de areia por resíduo não acarretaram em perdas significativas na resistência à compressão ou no aumento da absorção de água dos blocos. Ensaios químicos permitiram verificar que não haverá problemas de lixiviação ou solubilização de contaminantes no ambiente durante a vida útil dos blocos de concreto, pois foi constatada a solidificação/estabilização do resíduo. Portanto, a utilização do referido resíduo industrial na fabricação de blocos de concreto para pavimentação mostrou-se promissora, apresentando assim, uma alternativa para a disposição adequada desse resíduo, bem como a possibilidade de economia de matérias-primas utilizadas no ramo da construção civil.

**Palavras-chave:** Resíduo sólido. Reaproveitamento. Estabilização. Solidificação. Blocos de concreto.

## UTILIZATION OF INDUSTRIAL SOLID WASTE IN THE MANUFACTURE OF CONCRETE PAVING BLOCKS: STUDY OF PHYSICAL, CHEMICAL AND MECHANICAL CEMENT MATRIX BEHAVIOR

### ABSTRACT

This study aimed the reuse of an industrial solid waste (consisting mostly of magnesium oxide) generated mainly by electroplating industries in the manufacturing of concrete paving blocks. For the characterization of the residue were made of the particle size analysis, X-ray fluorescence, and solubilization leaching. Blocks were made with 100 mm (width) 200 mm (length) and 80 mm (height), using formulations with 2%, 3%, 4%, 5% and 10% of waste in concrete mass as well as block reference (without addition of waste), for comparison reasons. The blocks were characterized by means of the compressive strength test and water absorption, and the residue immobilization efficiency in the cementitious matrix by means of the technique of solidification / stabilization was investigated. The results allowed to classify the waste as non-hazardous, non-inert (Class IIA). It was found that replacement of 10% of sand residue did not result in significant

loss in compressive strength or increasing the water absorption of the blocks. Chemical tests allowed verifying that there is no solubilization or leaching problems of contaminants during the useful life of the concrete blocks, it was observed the solidification / stabilization residual. Therefore, the use of the said industrial wastes in making concrete blocks for paving showed promise, thus presenting an alternative to the proper disposal of this waste, as well as the possibility of saving raw materials used in the construction industry.

**Keywords:** Solid waste. Reuse. Stabilization. Solidification. Concrete blocks.

## 1. INTRODUÇÃO

As indústrias são consideradas grandes geradoras de resíduos poluentes ao ambiente, pela própria transformação dos recursos naturais em bens de consumo. Com isso, o processamento de materiais resulta na produção de grandes quantidades de substâncias, algumas agressivas ao homem e ao meio, as quais, muitas vezes não possuem aplicabilidade imediata, resultando em interferências em todo o processo de equilíbrio dos ecossistemas devido ao seu tratamento e disposição inadequados.

Muitos dos resíduos industriais podem apresentar-se na forma sólida, líquida ou gasosa, afetando locais muitas vezes distantes do local de sua geração (Pablos, 2008). Paralelamente ao crescimento da geração desses resíduos amplia-se o anseio por um desenvolvimento sustentável e a urgência em se efetuar o gerenciamento criterioso dos rejeitos, de modo a permitir o controle e a prevenção da poluição do ambiente.

No Brasil, apesar do gerenciamento dos resíduos gerados pelas indústrias 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 construção civil é um setor que tem se mostrado promissor na utilização de resíduos industriais por meio do desenvolvimento de novos materiais para seu próprio consumo. Diversos estudos já foram e estão sendo realizados com o objetivo de desenvolver técnicas e tecnologias limpas e viáveis para a reutilização desses rejeitos.

Esse eixo de pesquisa centra-se no estudo da incorporação/reutilização de diversos resíduos industriais como matérias-primas para a fabricação de concretos, com o intuito de diminuir a demanda de recursos naturais explorados pelo setor da construção civil, juntamente com a necessidade da diminuição do impacto ambiental gerado pela grande quantidade de resíduos disponíveis.

Uma alternativa para eliminação de elementos contaminantes ao ambiente são as técnicas de solidificação/estabilização (S/E) de resíduos sólidos, 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, por meio da adição de aglomerantes ou da inserção em invólucros eficientes (Pablos, 2008).

Solidificação refere-se a um processo que vincula o meio contaminado com um reagente/aglomerante, alterando suas propriedades físicas e aumentando as propriedades mecânicas, como a resistência a compressão, diminuindo a sua permeabilidade e encapsulando os contaminantes para formar um material sólido. A estabilização refere-se ao processo que envolve uma reação química que reduz a lixiviação do resíduo perigoso, imobilizando os componentes químicos e diminuindo a solubilidade, tornando-os menos prejudiciais (Shi e Spence, 2004; USEPA, 2009).

Essa técnica pode ser implantada na reutilização de resíduos sólidos industriais que não possuem uma destinação adequada, ou seja, seriam apenas descartados, mas sem serem reutilizados. É possível também proporcionar características positivas a outro material por meio da sua

incorporação em matriz cimentícia, podendo assim ser utilizado na fabricação de artefatos de concreto com melhor qualidade para construção civil.

## 2. OBJETIVO

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi o estudo da reutilização/tratamento de um resíduo sólido industrial proveniente de indústrias de galvanoplastia, na fabricação de blocos de concreto para pavimentação. Foram investigadas as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos blocos de concreto fabricados com resíduo, além da eficiência de estabilização/solidificação dos contaminantes na matriz cimentícia.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Coleta e Caracterização do Resíduo

O resíduo utilizado na fabricação dos blocos de concreto foi coletado diretamente de uma indústria de galvanoplastia (na seção de fabricação de resistências elétricas) localizada na região de Piabiru – PR. Após coletado, o resíduo foi acondicionado em bombas plásticas devidamente lacradas e guardadas em local protegido.

A caracterização física do resíduo foi realizada por meio do ensaio de granulometria segundo a norma ABNT NBR 7181 (1984). A caracterização química foi realizada por meio das análises de fluorescência de raios-x (FRX) em espectrômetro de raios-x Rigaku, modelo ZSX Mini II, e lixiviação/solubilização, segundo as normas ABNT NBR 10005 (2004) e ABNT NBR 10006 (2004), respectivamente. Tanto o extrato lixiviado como o extrato solubilizado, foram submetidos a ensaios para determinação dos teores de contaminantes listados nos anexos F e G da norma ABNT NBR 10004 (2004) por meio de Espectrômetro de Absorção Atômica Varian - SPECTRAA-240FS e Cromatógrafo de íons, Metrohm – 850 Professional IC.

Para motivos de comparação também foram realizadas as análises de lixiviação e solubilização no cimento utilizado na fabricação dos blocos de concreto.

### 3.2 Fabricação e caracterização dos blocos de concreto para pavimentação

A fabricação dos blocos de concreto foi realizada na Fábrica de Artefatos da Universidade Estadual de Maringá e os pavimentos produzidos tiveram dimensões de 100 mm (largura) x 200 mm (comprimento) x 80 mm (altura).

Para a fabricação dos blocos foi utilizado o traço referência estabelecido por Franco (2011) (Tabela 1), que estudou a incorporação de resíduos de galvanoplastia na fabricação de blocos de concreto para pavimentação e obteve ótimos resultados em seus estudos. No presente trabalho, as proporções utilizadas resíduos em substituição ao agregado miúdo (areia) foram de 2%, 3%, 4%, 5% e 10%.

Tabela 1 – Traços (m/m) utilizados na fabricação dos blocos com incorporação de resíduo industrial.

Traço	A/G	Cimento	Areia	Resíduo	Pedrisco
Referência	0,40	1	2,50	0	1,35
2%	0,40	1	2,597	0,02	1,35
3%	0,40	1	2,571	0,03	1,35
4%	0,40	1	2,544	0,04	1,35
5%	0,40	1	2,518	0,05	1,35
10%	0,40	1	2,385	0,10	1,35

Referência – corpo-de-prova sem adição de resíduo.

A/G – relação água/aglomerante.

O aglomerante empregado foi o cimento Portland CP V – ARI (alta resistência inicial) da marca Cauê, o agregado miúdo utilizado foi areia média com granulometria variando entre 0,2 mm a 0,6 mm, o agregado graúdo utilizado foi pedrisco com granulometria variando entre 2,4 mm a 9,5 mm. Após a fabricação e o tempo de cura necessário, os blocos de concreto fabricados foram caracterizados de acordo com as metodologias listadas a seguir.

Caracterização física: Foi realizada por meio dos ensaios de determinação da absorção de água baseados na metodologia proposta pela ABNT NBR 9781 (2013) na idade de 28 dias de cura.

Caracterização mecânica: Foi realizada por meio dos ensaios de resistência a compressão, segundo as recomendações da norma ABNT NBR 9781 (2013): Peças de concreto para pavimentação, também na idade de cura de 28 dias.

Caracterização química: Os ensaios de lixiviação/solubilização nos blocos foram realizados conforme as metodologias anteriormente citadas das normas ABNT NBR 10005 (2004) e ABNT NBR 10006 (2004), respectivamente, com detecção de contaminantes utilizando-se espectrômetro e absorção atômica e cromatógrafo de íons.

Cálculo da eficiência de retenção de contaminantes da matriz cimentícia: a determinação da eficiência de retenção dos metais na matriz de cimento (blocos), foi calculada por meio da Equação 1:

$$E_{retenção} = \frac{C_{bruto} - C_{tratado}}{C_{bruto}} \quad (1)$$

Em que:  $E_{retenção}$  - Eficiência de retenção, em porcentagem (%);  $C_{bruto}$  - Concentração do metal no extrato lixiviado/solubilizado do resíduo bruto, em (mgL<sup>-1</sup>);  $C_{tratado}$  - Diferença entre a concentração do metal lixiviado/solubilizado nos blocos sem adição do resíduo (referência) e com adição do resíduo, em (mgL<sup>-1</sup>).

Para maior confiabilidade, os resultados de resistência à compressão e absorção de água foram submetidos aos testes estatísticos de Análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey. Foi utilizado o software STATISTICA 8.0 para a realização do estudo.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização do Resíduo

A Tabela 2 apresenta à análise granulométrica do resíduo utilizado na fabricação dos blocos de concreto.

Tabela 2 – Análise granulométrica do resíduo industrial.

Mesh	Abertura (mm)	Massa da peneira (g)	Massa retida (g)	Retido (%)	Retido acumulado acima (%)	Retido acumulado abaixo (%)
80	0,180	392,37	205,98	41,31	41,31	58,69
100	0,150	319,07	59,31	11,89	53,20	46,80
170	0,090	299,96	140,69	28,21	81,41	18,59
270	0,053	306,19	66,74	13,38	94,79	5,21
400	0,036	300,13	21,90	4,39	99,18	0,82
Fundo		298,86	4,06	0,82	100	0
Soma			498,68	100		

Por meio dos resultados foi possível verificar que a distribuição granulométrica do resíduo industrial utilizado na fabricação dos blocos encontrou-se entre as faixas granulométricas de 0,018 mm e 0,036 mm.

Na Tabela 2 observou-se a retenção de resíduo em todas peneiras, até mesmo no fundo, ou seja, há algumas partículas (0,82%) com diâmetros menores que 0,036mm. A abertura que obteve

maior retenção de partículas do resíduo foi a de 0,180 mm, retendo cerca de 41,31% da massa de resíduo industrial analisado. Segundo Ortigão (2007), pode-se classificar o resíduo na faixa granulométrica de finos, quando comparado com a curva granulométrica da areia.

Na Tabela 3 encontram-se os resultados da análise de fluorescência de raios-x do resíduo utilizado. Essa análise é fundamental, pois permite avaliar qualitativamente os minerais presentes no resíduo.

Tabela 3 – Fluorescência de raios-x: porcentagem em massa dos compostos presentes na composição do resíduo.

Óxidos	(% massa)	Óxidos	(% massa)	Óxidos	(% massa)
MgO	71,77	CaO	3,04	CuO	0,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,95	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,99	MnO	0,13
SiO <sub>2</sub>	12,48	ZnO	0,02	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,44	SO <sub>3</sub>	0,09		

O composto presente em maior quantidade no resíduo, com 71,77%, é o óxido de magnésio (MgO). Esse valor elevado está relacionado a origem do resíduo utilizado (indústria de resistências elétricas e de galvanoplastia). A sílica (SiO<sub>2</sub>), também apresentou porcentagem mássica considerável na matriz do resíduo (12,48%) pois, na indústria onde o rejeito foi coletado, utiliza-se no jateamento das peças a serem galvanizadas, microesferas de vidro, o que pode ter causado algum tipo de contaminação. O óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) também apresentou 10,95% em massa. A presença desse óxido pode estar vinculada ao desgaste de equipamentos, composição das peças galvanizadas ou até mesmo contaminação de agentes externos, algo muito comum nas indústrias de galvanoplastia.

A Tabela 4 apresenta os contaminantes presentes no lixiviado do cimento CPV – ARI e no resíduo utilizado na fabricação dos blocos de concreto, bem como os limites de concentração estabelecidos pela norma ABNT NBR 10004 (2004).

Tabela 4 – Concentração de contaminantes presentes no extrato lixiviado do cimento CPV – ARI e do resíduo.

Contaminante	Limite NBR 10004/2004 (mgL <sup>-1</sup> )	Cimento* (mgL <sup>-1</sup> )	Resíduo* (mgL <sup>-1</sup> )
<i>Ba</i>	70,00	25,11	3,98
<i>Cd</i>	0,50	0,04	0,09
<i>Pb</i>	1,00	0,80	0,22
<i>Cr</i>	5,00	0,89	0,16
<i>Hg</i>	0,10	< 0,10	< 0,10
<i>Ag</i>	5,00	< 0,02	< 0,02
<i>Fluoreto (F)</i>	150	n.d	5,52

Os valores indicados por < (menor que) estão abaixo do limite de detecção do espectrômetro de absorção atômica; n.d: não detectado pelo cromatógrafo de ions.

\* Resultados com desvio padrão menor que 0,01.

Quando comparados com os valores estabelecidos pela norma vigente é possível observar que todos os contaminantes presentes tanto no resíduo como no cimento apresentaram concentrações lixiviadas abaixo dos limites máximos aceitáveis. Ou seja, isso permite classificar tanto o cimento quanto o resíduo industrial utilizado, como resíduos sólidos Classe II, não perigosos.

Para a classificação dos resíduos quanto à sua natureza inerte (Classe IIA – não inerte ou Classe IIB – inerte), foi necessário a realização do ensaio de solubilização. Na Tabela 5 são apresentadas as concentrações dos contaminantes solubilizados no cimento CPV – ARI e no resíduo industrial juntamente com os limites estipulados novamente pela norma ABN NBR 10004 (2004).

Tabela 5 – Concentração de contaminantes presentes no extrato solubilizado do cimento CPV – ARI e do resíduo.

Contaminante	Limite NBR 10004/2004 (mgL <sup>-1</sup> )	Resíduo* (mgL <sup>-1</sup> )	Cimento* (mgL <sup>-1</sup> )	Contaminante	Limite NBR 10004/2004 (mgL <sup>-1</sup> )	Resíduo* (mgL <sup>-1</sup> )	Cimento* (mgL <sup>-1</sup> )
<i>Al</i>	0,20	0,34	< 0,30	<i>Hg</i>	0,001	< 0,10	< 0,10
<i>Ba</i>	0,70	4,26	10,52	<i>Ag</i>	0,05	< 0,02	< 0,02
<i>Cd</i>	0,005	0,03	0,03	<i>Na</i>	200	60,46	200,21
<i>Pb</i>	0,01	< 0,10	0,36	( <i>Cl</i> )	250	n.d	1,02
<i>Cu</i>	2,00	< 0,03	< 0,03	( <i>F</i> )	1,50	n.d	0,95
<i>Cr</i>	0,05	0,18	0,49	( <i>NO<sup>3-</sup></i> )	10,00	n.d	1,15
<i>Fe</i>	0,30	0,81	0,91	( <i>SO<sup>4<sup>2-</sup></sup></i> )	250	n.d	n.d
<i>Mn</i>	0,10	1,38	0,71				

Os valores indicados por < (menor que) estão abaixo do limite de detecção do espectrômetro de absorção atômica; n.d: não detectado pelo cromatógrafo de íons.

\* Resultados com desvio padrão menor que 0,01.

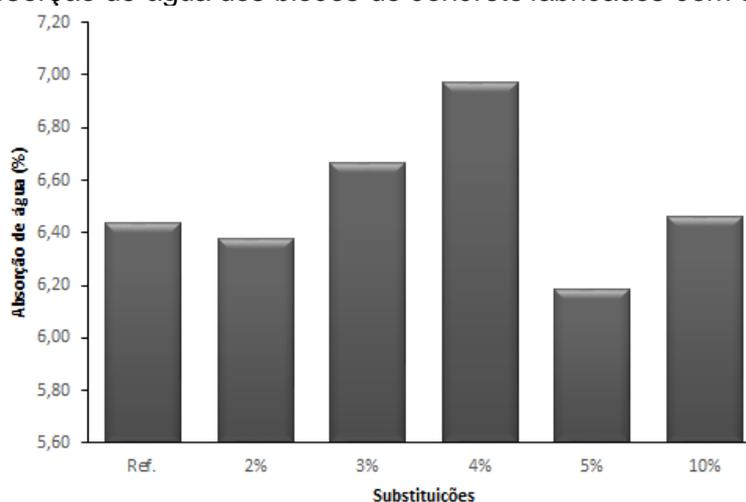
De acordo com os resultados pode-se observar que vários contaminantes apresentaram valores superiores aos limites da norma brasileira. No resíduo industrial os contaminantes que estão em desacordo com a norma são: alumínio (Al), bário (Ba), cádmio (Cd), cromo (Cr), ferro (Fe) e manganês (Mn). No cimento são: bário (Ba), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr), ferro (Fe), manganês (Mn) e sódio (Na).

Com isso, verificar-se que ambos, cimento e resíduo industrial enquadram-se na classificação de resíduo sólido Classe II A – Não perigoso, não inerte, segunda a norma ABNT NBR 10004 (2004).

#### 4.2 Caracterização dos Blocos de Concreto Fabricados

Na Figura 1 encontram-se a média dos resultados de absorção de água dos blocos de concreto com incorporação do resíduo industrial na idade de cura de 28 dias.

Figura 1 – Absorção de água dos blocos de concreto fabricados com o resíduo.



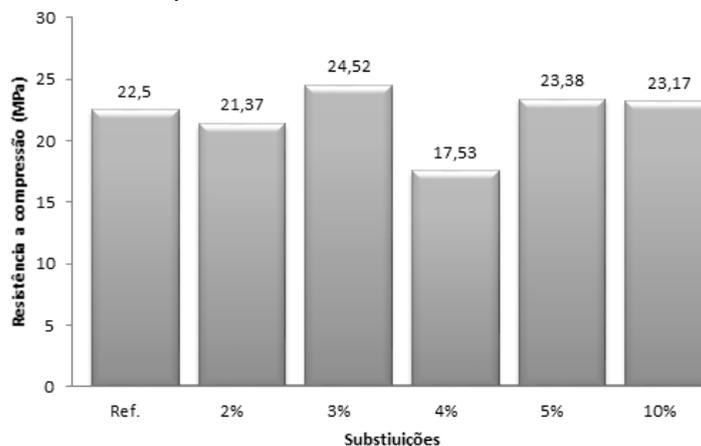
Por meio da Figura 1 é possível observar que os valores médios de absorção de água dos blocos foram levemente superiores a 6% (valor máximo permitido pela norma ABNT NBR 9781 (2013), sendo na incorporação de 4% o pico de maior absorção de água.

A análise de variância (ANOVA) referente aos resultados de absorção de água com 99% de confiança, apresentou um Pvalor de 0,2065 (Pvalor > 0,01), ou seja, não houve diferença significativa entre as médias dos ensaios. Com isso é possível afirmar que a incorporação de até

10% de resíduo na fabricação dos blocos de concreto não altera a propriedade física de absorção de água das peças.

A Figura 2 apresenta as médias de resistência à compressão dos blocos de concreto fabricados com o resíduo, bem como do bloco referência.

Figura 2 – Resistência a compressão dos blocos de concreto fabricados com o resíduo.



Segundo a norma ABNT NBR 9781 (2013) a resistência à compressão mínima exigida para os blocos de concreto a serem utilizados na pavimentação de vias para tráfego de veículos leves deve ser  $\geq$  (maior ou igual) a 35 MPa. Por meio da Figura 2 verifica-se que a resistência dos blocos fabricados com o resíduo e o bloco referência apresentaram valores abaixo do estipulado pela norma supracitada, porém, esses valores de resistência ainda tendem a aumentar com o aumento do tempo de cura dos blocos.

A análise de variância (ANOVA) referente aos resultados de resistência a compressão com 99% de confiança, apresentou um de 0,0091 ( $P$ valor < 0,01), ou seja, existe diferenças significativas entre as médias dos ensaios.

Para determinar quais os tratamentos tiveram suas médias estatisticamente diferenciadas entre si, foi necessário aplicar outro teste. Nesse caso utilizou-se o teste de Tukey para encontrar quais foram as médias que diferiram entre si. Os resultados para o teste de Tukey, encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos blocos

Tratamento	Média (MPa)	Tratamento	Média (MPa)
Referência	22,50 ab	4% de resíduo	17,55 a
2% de resíduo	21,37 ab	5% de resíduo	23,37 ab
3% de resíduo	24,53 b	10% de resíduo	23,17 ab

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

As médias dos tratamentos que apresentaram diferenças significativas entre si, foram as médias de resistência à compressão dos blocos fabricados com 3% e 4% de resíduo. No entanto, os tratamentos referência e 10% de resíduo, quando comparados pelo teste de Tukey não apresentaram diferenças significativas, assim, pode-se dizer que a incorporação de 10% de resíduo industrial em substituição ao agregado miúdo do concreto não afetou os valores de resistência à compressão dos blocos.

A concentração dos contaminantes presentes no extrato lixiviado dos blocos fabricados com o resíduo industrial, aos 28 dias de cura, estão listados na Tabela 7.

Tabela 7 – Concentração de contaminantes presentes no extrato lixiviado dos blocos fabricados com resíduo aos 28 dias de cura.

Contaminante	Limite NBR 10004/2004 (mgL <sup>-1</sup> )	Ref.*	2%*	3%*	4%*	5%*	10%*
Ba	70,00	9,19	8,83	9,76	14,38	17,82	17,25
Cd	0,50	0,05	0,03	0,07	0,04	0,03	0,04
Pb	1,00	0,36	0,36	0,28	0,41	0,29	0,51
Cr	5,00	0,15	0,17	0,18	0,21	0,21	0,24
Hg	0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Ag	5,00	0,03	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Fluoreto (F <sup>-</sup> )	150	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

Os valores indicados por < (menor que) estão abaixo do limite de detecção do aparelho utilizado  
n.d: não detectado pelo cromatógrafo de íons.

\* Resultados com desvio padrão menor que 0,01.

Por meio dos resultados apresentados pode-se observar que em todas as porcentagens de substituição de agregado miúdo por resíduo, não houve interferência significativa na concentração dos contaminantes no extrato lixiviado dos blocos confeccionados, quando comparados aos valores apresentados pelo bloco referência (sem a adição de resíduo). Ainda com base nos valores apresentados na Tabela 7, pode-se verificar que o resíduo sólido proveniente dos blocos fabricados, após sua utilização, pode ser classificado como Classe II – não perigoso.

O bário (Ba) foi o contaminante que apresentou um significativo aumento de concentração devido ao aumento da incorporação de resíduo nos blocos, porém, esse aumento não foi suficiente para alterar as características de periculosidade do lixiviado provenientes das peças.

Na Tabela 8 são apresentados os contaminantes presentes no extrato solubilizado dos blocos fabricados com o resíduo industrial aos 28 dias de cura.

Tabela 8 - Concentração de contaminantes presentes no extrato solubilizado dos blocos fabricados com resíduo aos 28 dias de cura.

Contaminante	Limite NBR 10004/2004 (mgL <sup>-1</sup> )	Ref.*	2%*	3%*	4%*	5%*	10%*
Al	0,20	0,91	0,65	0,75	0,35	0,26	0,17
Ba	0,70	8,30	10,92	13,60	9,45	12,67	15,69
Cd	0,005	0,04	0,04	0,06	0,05	0,05	0,042
Pb	0,01	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Cu	2,00	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Cr	0,05	0,19	0,15	0,19	0,16	0,22	0,20
Fe	0,30	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06
Mn	0,10	0,85	0,74	0,77	1,05	0,98	0,91
Hg	0,001	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Ag	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Na	200	40,21	40,39	40,34	40,49	43,01	41,33
Cloreto(Cl <sup>-</sup> )	250	1,15	1,30	1,42	n.d	1,39	n.d
Fluoreto(F <sup>-</sup> )	1,50	0,26	0,25	0,35	0,18	0,27	0,19
Nitrato(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	10,00	5,37	2,90	1,96	2,74	3,78	6,82
Sulfato(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	250	30,26	30,45	54,02	39,33	35,54	30,63

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

\* Resultados com desvio padrão menor que 0,01.

As concentrações dos elementos bário (Ba), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr) e mercúrio (Hg), obtidas no extrato solubilizado dos blocos fabricados, atingiram valores acima do permitido pela norma ABNT NBR 10004 (2004), com isso o resíduo dos blocos pode ser classificado como

Classe IIA, não perigoso, não inerte. Além disso, não foi verificada nenhuma correlação entre a adição de resíduo e o aumento da solubilização de contaminantes.

A Tabela 9 contém os resultados da eficiência de retenção de metais via lixiviado dos blocos fabricados. A prata (Ag) e o mercúrio (Hg) não participaram do cálculo de eficiência, pois suas concentrações no extrato lixiviado do resíduo e do cimento (Tabela 5), estiveram abaixo do limite de detecção.

Tabela 9 – Resultados da eficiência de retenção de metais via lixiviado.

Contaminantes	Eficiência de retenção (%)				
	2%	3%	4%	5%	10%
<i>Ba</i>	100,00	85,78	0,00	0,00	0,00
<i>Cd</i>	100,00	71,91	100,00	100,00	100,00
<i>Pb</i>	100,00	100,00	80,64	100,00	30,87
<i>Cr</i>	83,33	78,09	58,33	58,33	39,81

Conforme mostrado na Tabela 9, cádmio (Cd), chumbo (Pb) e cromo (Cr) apresentaram bons resultados de retenção, dando maior destaque ao cádmio, pois sua retenção foi total. Somente o bário (Ba) comportou-se de forma muito negativa, não apresentando retenção. Tal fato pode estar relacionado a concentração de bário encontrada no cimento, pois, no extrato lixiviado do mesmo já existia grande concentração deste contaminante, o que pode ter causado interferências na eficiência de retenção.

A Tabela 10 mostra os resultados de eficiência de retenção calculados via solubilizado.

Tabela 10 – Resultados da eficiência de retenção do extrato solubilizados dos blocos fabricados.

Contaminantes	Eficiência de retenção (%)				
	2%	3%	4%	5%	10%
Al	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Ba	38,54	0,00	73,01	0,00	0,00
Cd	100,00	58,48	73,33	75,76	100,00
Cr	100,00	99,72	100,00	83,52	92,46
Mn	100,00	100,00	85,53	90,52	95,73
Na	99,69	99,78	99,52	95,36	98,14

Via extrato solubilizado, a maioria dos metais apresentou excelente eficiência de retenção. Os contaminantes alumínio (Al) e cádmio (Cd) apresentaram retenções superiores a 100%, já o cromo (Cr), manganês (Mn) e sódio (Na) apresentaram quase 100% retenção. Novamente o bário (Ba) não apresentou eficiência de retenção, pois no extrato solubilizado do cimento também havia grande concentração deste contaminante.

Segundo Conner (1990), quando se utiliza cimento Portland para estabilizar e solidificar resíduos sólidos industriais, o pH da matriz favorece a conversão de cátions em hidróxidos, óxido e carbonatos insolúveis, incorporando íons metálicos à estrutura cristalina da matriz de cimento. Esse fato pode estar diretamente relacionado a ótima eficiência de retenção que a maioria dos metais estudados apresentou.

Diversos pesquisadores têm estudado os mecanismos de conversão química e retenção física de contaminantes durante o tratamento de resíduos sólidos industriais utilizando-se cimento. De acordo com Conner (1990) e Wiles (1987), a imobilização do íon cádmio ( $Cd^{2+}$ ) está relacionada à sua precipitação na matriz cimentícia, reagindo com o  $Ca(OH)_2$ , resultando na substituição dos íons  $Cd^{2+}$  e gerando o  $CdCa(OH)_4$ . Já o cromo ( $Cr^{3+}$ ) pode ser incorporado no interior da matriz, especialmente no interior do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (principal composto do cimento),

apresentando a fórmula molecular  $\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , ou ainda na forma de bentonita ( $3\text{CaO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) ou Cr-etringita ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaCrO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), segundo Jain (2008). Bishop (1986) afirma que a imobilização do chumbo ( $\text{Pb}^{+2}$ ) em cimento deve-se a dois fenômenos: primeiro a precipitação do hidróxido metálico e depois a sua encapsulação na fase C-S-H. De acordo com Navarro-Blasco *et al.* (2013), o mecanismo de imobilização do cobre em matrizes cimentícias está relacionado à formação do precipitado  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  em meio alcalino.

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

## 5. CONCLUSÃO

Com relação às características mecânicas, foi possível concluir que substituições de até 10% do agregado miúdo por resíduo não acarretaram em perdas significativas de resistência à compressão dos blocos. Constatou-se que nenhum dos blocos fabricados, inclusive o bloco referência, atingiu o valor mínimo de resistência estipulado pela legislação brasileira aos 28 dias de cura. Os valores de absorção de água também apresentaram-se satisfatórios para os blocos fabricados com até 10% de resíduo, mantendo-se dentro dos limites da legislação vigente, proporcionando aos mesmos ótima durabilidade.

Os resultados da caracterização química também permitiram concluir que não haverá problemas de lixiviação ou solubilização de contaminantes no ambiente durante a utilização dos blocos na pavimentação, pois foi constatada a solidificação/estabilização do resíduo por meio dos valores de eficiência de retenção obtidos para a maioria dos contaminantes.

O resíduo utilizado foi classificado segundo a norma ABNT NBR 10004 (2004) como não perigoso e não inerte (Classe II-A), com base nas concentrações dos elementos químicos lixiviados e solubilizados. Assim há necessidade de acompanhamento especial para o descarte final do mesmo. No entanto, pode-se concluir que a incorporação de até 10% de resíduo industrial no concreto das peças para pavimentação não afetou a lixiviabilidade, nem a solubilidade de contaminantes, bem como, constatou-se a estabilização/solidificação da maioria dos metais na matriz cimentícia.

Esses resultados são de grande importância, pois, mostram uma ótima alternativa para a minimização e disposição adequada de resíduos industriais, tornando-os inertes, além de contribuir também para a economia de matérias-primas utilizadas no setor da construção civil.

## REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9781. Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005. Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006. Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

CONNER, J.R. Chemical fixation and solidification of hazardous wastes. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.

FRANCO, J. M. Produção de blocos de concreto para pavimentação (BCP) utilizando resíduos de galvanoplastia. Maringá: UEM, 2011. Dissertação – Departamento de Engenharia Civil, Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, 2011.

INTERCEMENT, 2011. Disponível em: <<http://www.intercement.com/pt>>. Acesso em: 15 ago. 2012.

ORTIGÃO, J. A . R. Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos. 3ª ed. Terratek, 2007.

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. São Carlo: USP, 2008. Tese - Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2008.

PEREIRA, W. C.; MARCONDES E SILVA, D.; CARVALHO, J. O.; SOBRINHO, N. M.B. A.; RAVELLI NETO, A.; VILLAS BOAS, 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, 13(2): 163-170, 2008.

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, 34(4): 391-417, 2004.

USEPA. United States Environmental Protection Agency, Technology performance review: Selecting and using Solidification/stabilization treatment for site remediation”. Nov. 2009. Cincinnati, OH. Disponível em: <<http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r09148/600r09148.pdf>>. Acesso em: 13 de dez. de 2011.