



## ESTUDO DE RECICLAGEM DO RESÍDUO SÓLIDO CONSTITUÍDO POR AREIAS DE FUNDIÇÃO AGLOMERADAS COM ARGILA

**Javier Mazariegos Pablos (1); Eduvaldo Paulo Sichieri (2)**

(1) Departamento de Arquitetura e Urbanismo – Escola de Engenharia de São Carlos –

Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: [pablos@sc.usp.br](mailto:pablos@sc.usp.br)

(2) Departamento de Arquitetura e Urbanismo – Escola de Engenharia de São Carlos –

Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: [sichieri@sc.usp.br](mailto:sichieri@sc.usp.br)

### RESUMO

O trabalho seguiu uma metodologia que avaliou a estabilização do resíduo em matrizes de cimento Portland, melhoradas através da adição de sílica ativa. A estabilização do resíduo foi verificada através de ensaio de solubilização, o qual submete as matrizes solidificadas a contatos dinâmico e estático com água desionizada. Os desempenhos mecânico e físico das matrizes foram avaliados em ensaios de resistência à compressão e absorção de água. Os resultados obtidos demonstram que a sílica ativa contribui para o aumento da eficiência de fixação dos metais Al, Fe e Cr, por parte das matrizes de cimento Portland, além de proporcionar aumento significativo na resistência à compressão e diminuição da absorção de água. As composições investigadas foram utilizadas na confecção de tijolos maciços, moldados com design diferenciado, proporcionando modulação e encaixes que podem reduzir significativamente o consumo da argamassa de assentamento.

Palavras-chave: areia de fundição, solidificação/estabilização, reciclar, tijolos maciços.

### ABSTRACT

The work followed a methodology which evaluated the stabilization of the waste in matrices of Portland cement, improved with the addition of silica fume. The stabilization of the solid waste was verified by a solubilization test, which submits the solidified matrices to dynamic and static contacts with deionized water. The mechanical and physical performances of the matrices were evaluated by strength to compression and water absorption tests. The obtained results demonstrate that the silica fume contributes for the metals Al, Fe and Cr fixation efficiency increase by the Portland cement matrices, besides providing significant increase of the compressive strength and reduction of the water absorption. The investigated compositions had been used in the confection of solid bricks, conceived with a singular design, allowing modulation and rabbets that can significantly reduce the consumption of the layering mortar.

Keywords: foundry sand, solidification/stabilization, recycle, solid bricks.

### 1 INTRODUÇÃO

Entre todos os problemas que a humanidade enfrenta, um dos principais é a necessidade de minimizar os efeitos da degradação ambiental e social. Isso é possível via desenvolvimento e aplicação de pesquisas científicas e tecnológicas, que visem encontrar soluções para os problemas gerados pelo progresso e que consigam repercussões positivas para o meio ambiente e para o aprimoramento da cidadania, no sentido de obter uma melhor qualidade de vida para as próximas gerações. Dentro desse contexto, uma das questões de fundamental importância para o ser humano é a necessidade de reaproveitar, ou reciclar o lixo, os rejeitos e os resíduos por ele gerados, como forma de recuperar matéria e energia, visando a preservação de recursos naturais e uma menor degradação do meio ambiente, além da geração de empregos e riquezas, proporcionando melhoria nas condições de vida das comunidades.

As indústrias são consideradas degradadoras do meio ambiente, pela própria transformação dos recursos naturais em bens de consumo e pelo fato de que esse processamento de materiais culmina com a produção de grande quantidade de substâncias, algumas agressivas ao homem e ao meio, as quais não têm aplicabilidade imediata, resultando em uma interferência em todo o processo de

equilíbrio dos ecossistemas. As siderúrgicas, em geral, são consideradas como empresas que produzem grandes efeitos nocivos ao meio ambiente, tanto pela utilização de grande quantidade de recursos naturais, quanto devido à geração de alto volume de substâncias estranhas ao meio. Particularmente, as indústrias de fundição geram vários tipos de resíduos, entre eles um tipo de resíduo sólido proveniente do descarte das denominadas “areias de fundição aglomeradas com argila”, objeto de estudo na presente pesquisa.

A investigação adotou a técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland, devido à simplicidade do processo e ao baixo custo, além disso, é particularmente recomendada para resíduos metálicos (SAITO, et.al, 1985; apud HANNA, 1996). Segundo POON et al. (1986), a tecnologia de solidificação/estabilização de resíduos é um pré-tratamento indutor de reações químicas e mecanismos físicos que fixam elementos ou compostos tóxicos em polímeros impermeáveis ou em cristais estáveis. Alguns pesquisadores vêm utilizando o processo de estabilização de resíduos perigosos contendo metais pesados através da solidificação em matrizes de cimento Portland, assim como: MERRIT & BATCHELOR (1993), WILK (1997), CONNER (1997), ADASKA (1998) e BHATTY (1999). No Brasil, alguns trabalhos podem ser citados: CLAUDIO (1987), HANNA (1990 e 1996), PABLOS (1995), OLIVEIRA (1996), MARAGNO (1999), PINTO (2001), SILVA (2002) e ALBERONI (2006).

## 2 OBJETIVO

Verificar a viabilidade técnica da reciclagem do resíduo sólido industrial, constituído por areias de fundição aglomeradas com argila, através da sua utilização na composição de argamassas de cimento Portland, melhoradas com adição de sílica ativa, usadas na fabricação de tijolos maciços para execução de alvenarias.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Conhecimento da fonte geradora

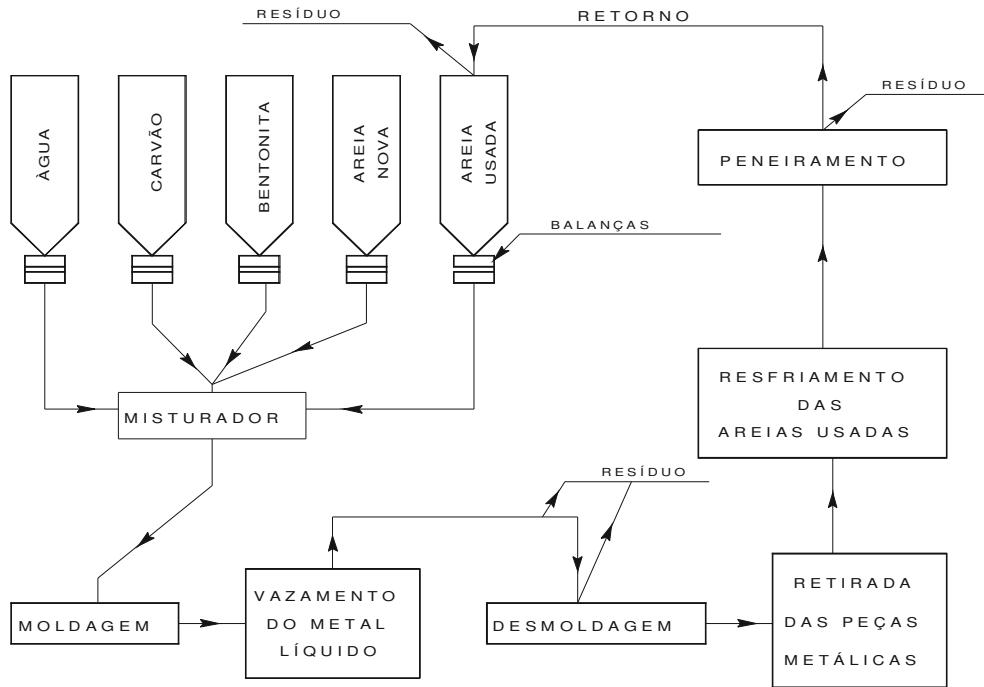
O resíduo sólido em questão é proveniente das areias de fundição aglomeradas com argila, usadas na moldagem peças metálicas. A empresa geradora está localizada na cidade de São Carlos, Estado de São Paulo e, seu setor de fundição, atinge uma produção aproximada de 2500 toneladas de peças metálicas de ferro cinzento por mês. Para isso, descarta cerca de 700 toneladas de resíduo sólido proveniente do desmonte dos moldes de areia. A areia-base utilizada na composição das areias de fundição é do tipo silicosa, encontrada em jazidas da região e fornecida com granulometria específica. A argila utilizada como aglomerante é a bentonita sódica ativada. Para melhorar algumas características e propriedades dos moldes é utilizado, como aditivo, o carvão mineral em pó. Dados fornecidos pela empresa indicam que as areias de fundição empregadas possuem basicamente a seguinte composição:

**Tabela 1** - Composição das areias de fundição

Componente	Proporção em massa (%)
Areia silicosa	83 a 89
Argila (bentonita)	8 a 13
Carvão mineral	0,6 a 1,0
Água	3

Com o vazamento do metal líquido nos moldes, a areia de fundição passa por um processo de queima a uma temperatura próxima de 1400  $^{\circ}\text{C}$ . Nessa temperatura a areia-base não se funde, mantendo a estrutura granular cristalizada, porém grande parte da argila perde suas características aglomerantes, transformando-se em material pulverulento, ou aderindo aos grãos de areia.

A seguir, é apresentado um fluxograma simplificado do processo de fundição, assim como, em quais etapas o resíduo é gerado:



**Figura 1** - Fluxograma dos processos de fundição e de geração do resíduo

Como verificado na Figura 1, as areias de fundição usadas são reaproveitadas, através de um processo de recuperação e regeneração.

As areias de fundição descartadas, ou seja, as que realmente se transformam em resíduo, são provenientes de pedaços dos moldes que se desagregam durante o percurso nas esteiras rolantes e caem no chão, assim como do esvaziamento parcial do silo, destinado ao armazenamento das areias usadas, que é efetuado quando se encontra excessivamente cheio.

### 3.2 Caracterização do resíduo sólido

Para efetuar a caracterização do resíduo, e consequente classificação, foram empregadas as especificações estabelecidas pela ABNT, como segue:

- NBR 10007 (2004) – Amostragem de resíduo sólido;
- NBR 10006 (2004) – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos;
- NBR 10005 (2004) – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos;
- NBR 10004 (2004) – Resíduos sólidos: classificação.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – USP:

**Tabela 2** – Análise do extrato lixiviado do resíduo

Elemento	Unidade	Lixiviação (mg/L)	Lixiviação (mg/L) L.M.
Arsênio	mg As/L	< 0,001	1,0
Bário	mg Ba/L	< 0,03	70,0
Cádmio	mg Cd/L	< 0,004	0,5
Chumbo	mg Pb/L	< 0,044	1,0
Cromo Total	mg Cr/L	0,034	5,0
Mercúrio	mg Hg/L	< 0,001	0,1
Prata	mg Ag/L	< 0,009	5,0
Selênio	mg Se/L	< 0,003	1,0
Fluoretos	mg F/L	< 0,1	150,0

L.M.- Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

**Tabela 3** – Análise do extrato solubilizado do resíduo

Elemento	Unidade	Solubilização (mg/L)	Solubilização (mg/L) L.M.
Alumínio	mg Al/L	3,64	0,2
Arsênio	mg As/L	0,017	0,01
Bário	mg Ba/L	< 0,30	0,7
Cádmio	mg Cd/L	< 0,004	0,005
Chumbo	mg Pb/L	< 0,004	0,01
Cobre	mg Cu/L	0,263	2,0
Cromo Total	mg Cr/L	0,12	0,05
Ferro	mg Fe/L	3,31	0,3
Manganês	mg Mn/L	< 0,01	0,1
Mercúrio	mg Hg/L	< 0,001	0,001
Prata	mg Ag/L	< 0,009	0,05
Selênio	mg Se/L	< 0,003	0,01
Sódio	mg Na/L	71,2	200,0
Zinco	mg Zn/L	0,017	5,0
Cianetos	mg CN/L	< 0,042	0,07
Cloreto	mg Cl/L	61,3	250,0
Fenóis	mg C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH/L	< 0,001	0,01
Fluoretos	mg F/L	0,19	1,5
Nitratos	mg N/L	< 0,85	10,0
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> /L	53,0	250,0
Surfactantes	mg LAS/L	< 0,03	0,5

L.M.- Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

Os parâmetros que estão em desacordo com o Limite Máximo (L.M.) estabelecido pela ABNT NBR 10004 (2004), em seu anexo G, referente aos padrões para o ensaio de solubilização, estão grifados na Tabela 3. A análise dos resultados indica que o resíduo sólido deve ser classificado como Classe II A - “não perigoso e não inerte”.

### 3.3 Caracterização do resíduo como agregado

Em todos os procedimentos realizados com a presença do resíduo, exceto nos relativos à sua classificação como resíduo sólido, o mesmo passou por um processo de secagem ao ar livre, através do seu espalhamento e exposição aos raios solares durante no mínimo seis horas. Após esta secagem, o resíduo sofreu um peneiramento, em peneira com malha de abertura 4,8 mm, sendo que somente ficaram retidos na peneira alguns poucos pedaços de metal, correspondente a aproximadamente 0,01% da massa total peneirada.

A caracterização do resíduo, como agregado, foi realizada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7211 (2005)- Agregados para concreto – especificação, obtendo-se os seguintes resultados:

- Teor de materiais pulverulentos: 8,8 %
- Teor de torrões de argila e partículas friáveis: 10,6 %
- Teor de materiais carbonosos: 0,7 %

- Teor de impurezas orgânicas: 1,38 %
- Massa específica: 2,60 Kg/dm<sup>3</sup>
- Massa unitária: 1,16 Kg/dm<sup>3</sup>
- Teor de umidade (após secagem ao ar livre): 2,12 %
- Análise granulométrica (ANEXO): muito fina (zona 1); dimensão máxima característica = 1,2mm ; módulo de finura = 1,77.

### 3.4 Composição das argamassas

#### 3.4.1 Materiais empregados

Cimento Portland do tipo composto com escória de alto forno até 34%, com classe de resistência à compressão de 32 MPa aos 28 dias, o qual é denominado CP II E -32. A presença de escória de alto forno e de baixo teor de C<sub>3</sub>A faz com que este tipo de cimento possua um bom desempenho em ambientes agressivos, principalmente na presença de sulfatos. Este tipo de cimento Portland desenvolve um calor de hidratação considerado médio, fator que não causa microfissuras excessivas no seu processo de início de pega, além de proporcionar tempos de fim de pega e de endurecimento não muito longos. Ao mesmo tempo, o cimento tipo CP II E -32 possui compatibilidade com outros componentes químicos, como aditivos e adições.

Areia natural, tipo silicosa, com composição granulométrica (ANEXO) semelhante à do resíduo sólido: muito fina (zona 1), dimensão máxima característica = 1,2mm e módulo de finura = 1,69.

A adição de sílica ativa, nas argamassas de cimento Portland contendo o resíduo sólido, objetivou a obtenção de matrizes mais compactas e menos porosas, no sentido de melhorar as propriedades mecânica e física e, também, a eficiência de estabilização dos metais presentes no resíduo.

#### 3.4.2 Composições

As composições investigadas na presente pesquisa foram estabelecidas com base em dados de pesquisas anteriores desenvolvidas por PABLOS (1995) e OLIVEIRA (1996), realizadas com o mesmo resíduo sólido em questão, proveniente da mesma indústria geradora, empregando quantidade de água adequada à obtenção de argamassas com consistência plástica e constante. Porém, como o processo de fabricação dos tijolos maciços utiliza o sistema de prensagem, na presente pesquisa a quantidade de água foi reduzida para que as argamassas apresentassem consistência seca.

A quantidade de água presente nas misturas foi estabelecida através da determinação da umidade ótima de compactação (ABNT NBR 12023 – Solo-cimento – Ensaio de Compactação, 1992) para cada composição. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos – USP. Nestes ensaios, a quantidade de água é especificada pela porcentagem de massa de água em relação à massa dos demais materiais secos presentes na composição.

A quantidade de sílica ativa foi estabelecida constante e igual a 10% da massa de cimento. AITCIN (2000) sugere uma dosagem de sílica ativa entre 8% e 10% em relação à massa de cimento, para a elaboração de concretos de alto desempenho. NEVILLE (1997) estabelece que a presença de 5% a 10% de sílica ativa em relação à massa de cimento reduz consideravelmente a permeabilidade dos concretos.

Foram elaborados três tipos de composição: cimento e areia natural (CA); cimento e resíduo (CR); cimento, resíduo e sílica ativa (CRS), em massa, conforme tabelas a seguir:

**Tabela 4** – Composições com cimento e areia natural

Denominação	Cimento : Areia natural : Água		Água/Mat.sec. (%)
	traço	composição	
CA1	1 : 1 : 0,24	44,6% : 44,6% : 10,8%	12,2
CA3	1 : 3 : 0,50	22,2% : 66,6% : 11,2%	12,4

**Tabela 5** – Composições com cimento e resíduo

Denominação	Cimento : Resíduo : Água		Água/Mat.sec. (%)
	traço	composição	
CR1	1 : 1 : 0,26	44,2% : 44,2% : 11,6%	12,8
CR3	1 : 3 : 0,52	22,1% : 66,3% : 11,6%	13,0

**Tabela 6** – Composições com cimento, resíduo e sílica ativa

Denominação	Cimento : Resíduo : Sílica : Água		Água/Mat.sec. (%)
	traço	composição	
CRS1	1 : 1 : 0,10 : 0,30	41,6% : 41,6% : 4,16% : 12,64%	14,3
CRS3	1 : 3 : 0,10 : 0,60	21,3% : 63,9% : 2,13% : 12,67%	14,7

### 3.5 Avaliação das matrizes solidificadas

Em geral, a literatura referente estabelece três parâmetros considerados importantes na avaliação dos blocos monolíticos resultantes da aplicação da técnica de solidificação/estabilização de resíduos sólidos contendo metais pesados, através de matrizes cimentícias: o primeiro diz respeito à propriedade mecânica, avaliada através da resistência à compressão; o segundo envolve uma propriedade física, estabelecida pela porosidade do material, verificada através do ensaio de absorção de água; o terceiro caracteriza-se por uma propriedade química, a qual estabelece o grau de eficiência do processo de fixação dos constituintes perigosos do resíduo, avaliada através do ensaio de solubilização, uma vez que o resíduo estudado somente apresenta excesso de Alumínio(Al), Ferro(Fe) e Cromo(Cr) quando submetido ao ensaio de solubilização (Tabela 3).

Para a realização dos ensaios mecânico e físico, foram moldados 6 (seis) corpos-de-prova cilíndricos com 50mm de diâmetro e 100mm de altura para cada idade ensaiada, sendo 4 (quatro) para o ensaio de resistência à compressão e 2 (dois) para o ensaio de absorção de água. Os ensaios foram realizados nas idades de 28, 91 e 365 dias. A moldagem dos corpos-de-prova e a execução dos ensaios de resistência à compressão das argamassas foram realizadas conforme procedimentos estabelecidos pela *ABNT NBR 7215 (1996) – Cimento Portland: determinação da resistência à compressão*. Os ensaios para a determinação da absorção de água foram realizados conforme estabelecido na norma *ABNT NBR 9778 (2005) – Argamassa e Concreto Endurecidos: determinação da absorção de água por imersão*. A moldagem e os ensaios citados foram efetuados no Laboratório de Construção Civil do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da EESC – USP.

Para a realização dos ensaios de solubilização foram moldados 4 (quatro) corpos-de-prova cilíndricos com 32mm de diâmetro e 64mm de altura, para cada idade ensaiada, os quais foram moídos e peneirados em peneira com abertura 9,5mm. Os ensaios de solubilização foram realizados nas idades de 28 e 365 dias, para as composições tipo CR e CRS.

As composições foram submetidas ao ensaio de solubilização conforme procedimentos estabelecidos na *ABNT NBR 10006 (2004) – Procedimento para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos*. A obtenção dos extratos solubilizados foi realizada no Laboratório de Resíduos Sólidos do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC – USP. As análises dos extratos solubilizados para a detecção dos elementos Alumínio (Al), Ferro (Fe) e Cromo (Cr) foram efetuadas no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC – USP, utilizando spectrofotômetro de absorção atômica Intralab AA-1275, com limite de quantificação de 0,005 mg\l.

**Tabela 7** - Resistência à compressão e absorção de água das composições CA1

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Absorção de água (%)
28	27,6	7,54
91	35,8	7,21
365	39,4	7,10

**Tabela 8-** Resistência à compressão e absorção de água das composições CA3

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Absorção de água (%)
28	20,7	10,83
91	26,5	10,65
365	28,6	10,50

**Tabela 9-** Resistência à compressão e absorção de água das composições CR1

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Absorção de água (%)
28	23,0	8,04
91	28,9	7,86
365	31,5	7,80

**Tabela 10-** Resistência à compressão e absorção de água das composições CR3

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Absorção de água (%)
28	16,5	11,65
91	20,9	11,52
365	22,1	11,36

**Tabela 11-** Resistência à compressão e absorção de água das composições CRS1

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Absorção de água (%)
28	31,3	4,96
91	37,5	4,51
365	39,0	4,46

**Tabela 12-** Resistência à compressão e absorção de água das composições CRS3

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Absorção de água (%)
28	22,8	8,98
91	26,1	8,82
365	28,8	8,80

**Tabela 13-** Análise do extrato solubilizado das composições CR1

Elemento	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M. (mg/L)
	28 dias	365 dias	
Al	0,38	0,30	0,2
Fe	< 0,005	< 0,005	0,3
Cr total	0,08	< 0,005	0,05

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

**Tabela 14-** Análise do extrato solubilizado das composições CR3

Elemento	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M. (mg/L)
	28 dias	365 dias	
Al	0,84	0,68	0,2
Fe	< 0,005	< 0,005	0,3
Cr total	0,10	0,08	0,05

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

**Tabela 15-** Análise do extrato solubilizado das composições CRS1

Elemento	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M. (mg/L)
	28 dias	365 dias	
Al	< 0,005	< 0,005	0,2
Fe	< 0,005	< 0,005	0,3
Cr total	< 0,005	< 0,005	0,05

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

**Tabela 16-** Análise do extrato solubilizado das composições CRS3

Elemento	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M. (mg/L)
	28 dias	365 dias	
Al	0,08	< 0,005	0,2
Fe	< 0,005	< 0,005	0,3
Cr total	< 0,005	< 0,005	0,05

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

### 3.6 Fabricação e avaliação dos tijolos maciços

O projeto dos tijolos maciços foi concebido, inicialmente, para ser utilizado na execução de alvenarias não portantes (de vedação) em um sistema construtivo sustentável de moradias de interesse social, ora em desenvolvimento no Laboratório de Construção Civil do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, sob coordenação do Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira (FAPESP – Processo 01/12915-6). Ao mesmo tempo, o *design* estabelecido para os tijolos maciços proporciona modulação e encaixes que podem reduzir significativamente o consumo da argamassa de assentamento.

O processo de fabricação dos tijolos utilizou uma prensa hidráulica, com capacidade de prensagem de 3 toneladas, possibilitando a manutenção da regularidade dimensional do tijolo, assim como de suas características físicas. Foram elaborados tijolos utilizando as composições tipo CRS1 e CRS3.

Após a fabricação, os tijolos foram colocados em uma câmara úmida, permanecendo em processo de cura pelo período de 15 dias, após esse período os tijolos ficaram em estantes até a data da realização dos ensaios. A idade estabelecida para a realização dos ensaios mecânico, físico e químico foi de 28 dias.

Os tijolos maciços foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão e absorção de água, de acordo com os procedimentos estabelecidos no método de ensaio ABNT NBR8492 (1984) – *Tijolo Maciço de Solo-Cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água*.

A verificação da eficiência de estabilização dos metais Al, Fe e Cr, presentes em excesso no resíduo bruto, foi efetuada através do ensaio de solubilização estabelecido na ABNT NBR10006 (2004).



**Figura 2** – Fabricação dos tijolos maciços

**Tabela 17 –** Resistência compressão tijolos CRS1

Exemplar	Carga de ruptura (Kgf)	Resistência à compressão (MPa)
01	20.900	6,7
02	21.840	7,0
03	21.210	6,8
04	22.460	7,2
05	21.850	7,0
06	20.590	6,6
07	21.520	6,9
08	22.770	7,3
09	21.200	6,8
10	22.150	7,1
<b>Média</b>	<b>21.650</b>	<b>6,9</b>

**Tabela 18** – Absorção de água tijolos CRS1

Exemplar	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção de água (%)
01	3.046,8	3.308,9	8,6
02	3.127,1	3.383,6	8,2
03	3.083,5	3.351,8	8,7
		<b>Média</b>	<b>8,5</b>

**Figura 3** – Tijolos maciços após fabricação**Tabela 21** - Extrato solubilizado tijolos CRS1

Elemento	Solubilização (mg/L)	Solubilização L.M. (mg/L)
Al	0,10	0,2
Fe	< 0,005	0,3
Cr total	< 0,005	0,05

L.M. – Limite Máximo ABNT NBR10004 (2004)

**Tabela 19** – Resistência compressão tijolos CRS3

Exemplar	Carga de ruptura (Kgf)	Resistência à compressão (MPa)
01	14.040	4,5
02	13.730	4,4
03	12.480	4,0
04	13.100	4,2
05	14.660	4,7
06	11.860	3,8
07	14.050	4,5
08	13.740	4,4
09	14.980	4,8
10	14.650	4,7
<b>Média</b>	<b>13.729</b>	<b>4,4</b>

**Tabela 20** – Absorção de água tijolos CRS3

Exemplar	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção de água (%)
01	3.036,6	3.391,9	11,7
02	2.967,2	3.287,6	10,8
03	2.983,5	3.323,6	11,4
		<b>Média</b>	<b>11,3</b>

**Tabela 22** - Extrato solubilizado tijolos CRS3

Elemento	Solubilização (mg/L)	Solubilização L.M. (mg/L)
Al	0,16	0,2
Fe	< 0,005	0,3
Cr total	< 0,005	0,05

L.M. – Limite Máximo ABNT NBR10004 (2004)

#### 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

A adição de sílica ativa proporcionou um aumento significativo na resistência à compressão com relação às matrizes tipo CR. Ao mesmo tempo, os resultados de absorção de água indicaram que a sílica ativa promoveu uma grande diminuição da absorção de água das matrizes. Os resultados de solubilização das matrizes CRS1 e CRS3 apresentaram uma excelente eficiência de fixação dos metais Alumínio, Ferro e Cromo. Portanto, a adição de 10% (em relação à massa de cimento) de sílica ativa nas matrizes de cimento Portland contribuiu significativamente para o aumento da resistência à compressão, para a diminuição da absorção de água e para o aumento da eficiência de fixação dos metais Al, Fe e Cr. Os tijolos maciços apresentaram diminuição da resistência à compressão e aumento da absorção de água, quando comparados com os resultados dos corpos-de-prova confeccionados com as mesmas composições, indicando que a prensa hidráulica utilizada proporciona menor adensamento do que a moldagem manual dos corpos-de-prova. Apesar disso, os resultados mostram-se satisfatórios quanto aos requisitos mecânico e físico, pois a especificação ABNT NBR8491-Tijolo Maciço de Solo-cimento (1984) estabelece as seguintes condições para a aceitação dos tijolos:

- A amostra ensaiada de acordo com a NBR8492 não deve apresentar a média dos valores de resistência à compressão menor do que 2,0 MPa, nem valor individual inferior a 1,7 MPa.
- A amostra ensaiada de acordo com a NBR8492 não deve apresentar a média dos valores de absorção de água maior do que 20%, nem valores individuais superiores a 22%.

Portanto, os resultados de resistência à compressão e de absorção de água dos tijolos maciços, fabricados com as composições CRS1 e CRS3, atendem plenamente os critérios de aceitação estabelecidos na especificação ABNT NBR8491. A análise do extrato solubilizado dos tijolos

maciços, CRS1 e CRS3, indicam que o Alumínio é o metal que apresenta a menor eficiência de fixação por parte das matrizes. Entretanto, as quantidades solubilizadas não excedem os limites estabelecidos na NBR10004 e podemos considerar as duas composições, como materiais inertes. Portanto, fica comprovada uma elevada eficiência de estabilização do resíduo nas matrizes CRS1 e CRS3, assim como a viabilidade técnica para a utilização dessas composições na fabricação de tijolos maciços para aplicação na execução de alvenarias.

## 5 REFERÊNCIAS

- ADASKA, W.S., 1998. **Solidification and Stabilization of Wastes Using Portland Cement.** Portland Cement Association, EB071, 2<sup>nd</sup> ed., Skokie, IL.
- ALBERONI, V.G. & YOKOYAMA, L. & DWECK, J., 2006. **Estudo de Processo de Solidificação/Estabilização de Resíduo Industrial Contendo Níquel.** V Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria, Anais.
- AITCIN, P.C., 2000. **Concreto de Alto Desempenho.** PINI, São Paulo, p.217-219.
- BHATTY, J.I., 1999. **Stabilization of Heavy Metals in Portland Cement, Sílica Fume / Portland Cement and Masonry Cement Matrices.** Portland Cement Association, RP348, Skokie, IL.
- CLAUDIO, J.R., 1987. **Resíduos Sólidos Perigosos – Solidificação de Lamas Tóxicas com Cimentos.** Dissertação de Mestrado, EP – USP, São Paulo.
- CONNER, J.R., 1997. **Guide to Improving the Effectiveness of Cement-Based Stabilization/Solidification.** Portland Cement Association, EB211, Skokie, IL.
- HANNA, R.A., 1990. **Estudo em Escala de Laboratório da Fixação de Metais em Matriz de Cimento Tendo em Vista a Disposição Final de Rejeitos Industriais Perigosos.** Dissertação de Mestrado, EP-USP, São Paulo.
- HANNA, R.A., 1996. **Estudo da Estabilização por Solidificação de Produtos Tóxicos em Cimento Portland: Uma Análise em Nível Microestrutural.** Tese de Doutorado, EP-USP, São Paulo.
- MARAGNO, A.L.F.C., 1999. **Solidificação de Lodo ao Cromo de Curtume em Matriz de Cimento.** Tese de Doutorado, EESC-USP, São Carlos.
- MERRITT, S.D. & BATCHELOR, B., 1993. **Applications of Soil and Cement Chemistry to Stabilization/Solidification.** Transportation Research Record, n.1424, p. 1-7, USA.
- NEVILLE, A.M., 1997. **Propriedades do Concreto.** Tradução: Salvador E. Giannusso. 2<sup>a</sup> ed., PINI, São Paulo, p.659-661.
- OLIVEIRA, R.C., 1996. **Encapsulamento de Areia de Fundição de Descarte em Matriz de Cimento.** Dissertação de Mestrado, EESC-USP, São Carlos.
- PABLOS, J.M., 1995. **Utilização do Resíduo Sólido Gerado pelo Descarte das Areias de Fundição Aglomeradas com Argila no Setor de Construção Civil.** Dissertação de Mestrado, EESC-USP, São Carlos.
- PINTO, C.A., 2001. **Estabilização por Solidificação em Cimento do Resíduo do Curtimento de Couro Contendo Cromo.** Dissertação de Mestrado, EP-USP, São Paulo.
- POON, C.S. & CLARK, A.I. & PERRY, R., 1986. **Permeability Study on the Cement Based Solidification for the Disposal of Hazardous Wastes.** Cement and Concrete Research, V. 16, p. 161-172, USA.
- SILVA, T.V., et al., 2002. **Estudo Comparativo de Normas de Lixiviação Aplicadas a Resíduos Perigosos Solidificados/Estabilizados em Cimento.** XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Anais, México.
- WILK, C.M., 1997. **Stabilization of Heavy Metal with Portland Cement: Research Synopsis.** Portland Cement Association, IS007, Skokie, IL.

## ANEXO