

DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METAIS PRESENTES EM AREIA VERDE DE  
FUNDIÇÃO: ESTUDO DE CASO DA FUNDIÇÃO TUPY S.A

Manuela Kuhnen Hermenegildo

Orientadora: Professora Dr<sup>a</sup>. Cátia Regina S. de Carvalho Pinto  
Co-orientador: Bárbara Samartini Queiroz Alves

2011/01



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL**

Manuela Kuhnen Hermenegildo

**DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METAIS  
PRESENTES EM AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO: ESTUDO DE  
CASO DA FUNDIÇÃO TUPY S.A**

Trabalho apresentado a Universidade  
Federal de Santa Catarina para  
Conclusão do Curso de Graduação em  
Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis

2011



Manuela Kuhnen Hermenegildo

**DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METAIS  
PRESENTES EM AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO: ESTUDO DE  
CASO DA FUNDIÇÃO TUPY S.A**

Florianópolis, julho de 2011

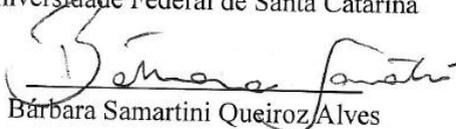
Trabalho submetido à Banca  
Examinadora como parte dos  
requisitos para Conclusão de Curso de  
Graduação em Engenharia Sanitária e  
Ambiental – TCC II

**Banca Examinadora:**



Prof.<sup>a</sup>, Dr.<sup>a</sup>, Cátia Regina S. de Carvalho Pinto  
Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina

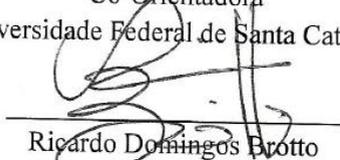


Bárbara Samartini Queiroz Alves

Bióloga

Co-Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina



Ricardo Domingos Brotto

Engenheiro Sanitarista e Ambiental

Universidade Federal de Santa Catarina



MSc., Cristiane Funghetto Fuzinatto

Oceanógrafa

Universidade Federal de Santa Catarina



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer à minha família por sempre incentivar meus estudos. À professora Cátia pelo apoio; e à Bárbara e ao José Barros pela colaboração na execução deste trabalho.



## RESUMO

A fundição é considerada uma atividade altamente poluidora por causa dos grandes volumes de resíduos sólidos produzidos, sendo a areia descartada de fundição o principal deles. A reutilização ou reúso está relacionada com a utilização das areias descartadas como subproduto em aplicações externas à indústria de fundição, podendo acontecer em atividades tais como: fabricação de concreto, construção civil em geral, material para construção, cobertura de aterros e na preparação de solos manufaturados para usos agrícolas e horticulturas. As aplicações de um material estão diretamente ligadas às suas propriedades físico-químicas. As areias verdes são um tipo de areia descartada de fundição, e devem possuir diversas qualidades para serem reutilizadas. Elas devem ser ambientalmente benignas, ou seja, não devem lixiviar metais, alcalinos, ou orgânicos em quantidades que possam ser nocivas a saúde humana e meio ambiente, devem ser economicamente favoráveis e, devem ser tecnicamente equivalente ao material que está substituindo. A caracterização química determina os potenciais contaminantes prejudiciais à saúde humana e meio ambiente, e está relacionada com a identificação dos elementos metálicos e componentes orgânicos presentes na areia. Este trabalho de conclusão de curso determinou a concentração de nove elementos traços presentes em uma amostra de areia verde da fundição Tupy S.A. e verificou, comparando os resultados obtidos com a legislação vigente e literatura relacionada, que no geral, esta areia descartada possui baixos níveis de contaminantes metálicos, e os metais presentes não impedem a reutilização.

**Palavras-chave:** Areia Descartada de Fundição. Areia verde. Análise de metais. Reutilização/reúso.



## ABSTRACT

Foundry is considered a highly polluting activity on the basis of large volumes of solid waste disposed, as spent foundry sand being the principal residue. Reutilization or reuse is related to the use of sands discarded as by-product in external applications to the foundry industry and can happen in activities such as: production of concrete, construction in general, material for construction, landfill cover and soil preparation manufactured goods for agricultural uses and horticulture. The applications of a material are directly linked to their physical and chemical properties. Green sand is one type of spent foundry sand, and must possess several qualities to be reused. They must be environmentally benign, which means that they should not leach metals or organics in quantities that could be hazardous to human health and the environment, they must be economically favourable and shall be technically equivalent to the material it is replacing. Chemical characterization determines the potential contaminants are hazardous to human health and the environment, and it is related to identification of metallic elements and organic components in the sand. This completion of course paper determined the concentration of nine trace elements present in a sample of green sand from foundry Tupy S.A. and verified by comparing the results obtained with the current legislation and related literature that in general, this spent sand has low levels of metal contaminants and metals present do not prevent reuse.

**Keywords:** Spent Foundry Sand. Green sand. Metals analysis. Reuse.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção Global de fundidos .....	5
Figura 2 – Ranking dos 10 maiores produtores do mundo .....	6
Figura 3 – Fluxograma de saídas do processo de fundição .....	9
Figura 4 – Fluxograma do processo de fundição – soluções .....	13



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos programas de reutilização de ADF .....	18
Quadro 2 – Ranking de Aplicações de reúso de ADF .....	26
Quadro 3 – Aplicação das ADF em alguns países .....	32
Quadro 4 – Elementos analisados .....	36



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físicas e geotécnicas das areias verdes .....	20
Tabela 2 – Comparação entre resultados da amostra sólida da Tupy e valores orientadores da Resolução nº420, CONAMA.....	42
Tabela 3 – Comparação entre concentração de elementos traços da amostra sólida da Tupy e literatura .....	43
Tabela 4 – Comparação entre resultados da amostra lixiviada da Tupy e legislação pertinente .....	45
Tabela 5 – Comparação entre concentração de elementos traços da amostra lixiviada da Tupy e literatura.....	46
Tabela 6 – Resultados de lixiviados - Lee e Benson (2006).....	47
Tabela 7 – Comparação Estudo C com TCLP .....	48



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABIFA – Associação Brasileira de Fundição  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ADF – Areia Descartada de Fundição  
ASTM – American Society for Testing and Materials  
CFR – Code of Federal Regulations  
CPAD – Central de Processamento, Armazenamento e Destinação final  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
ENS – Engenharia Sanitária e Ambiental  
FAAS – Espectrofotometria de Absorção Atômica com chama  
(traduzida)  
FIRST – Foundry Industry Recycling Starts Today  
HAP – Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos  
LIMA – Laboratório Integrado do Meio Ambiente  
SW 846 – Test Methods for Evaluating Solid Waste  
TCLP – Toxicity Characteristic Leaching Procedure  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina  
USDA – United States Department of Agriculture  
EPA – United States Environmental Protection Agency



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS .....	2
1.1.1	Objetivo Geral.....	2
1.1.2	Objetivos Específicos .....	2
1.2	JUSTIFICATIVA .....	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
2.1	A INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO .....	4
2.1.1	A Produção Global de Fundidos .....	5
2.1.2	A Produção Nacional de Fundidos .....	6
2.2	O PROCESSO DE FUNDIÇÃO.....	7
2.2.1	Geração de resíduos.....	8
2.3	AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO .....	10
2.3.1	Gestão de Soluções .....	12
2.3.2	Normas e Regulamentações Referentes à Areia Descartada de Fundição .....	14
2.3.2.1	Legislação Norte-Americana .....	17
2.3.3	Caracterização da Areia Verde de Fundição.....	19
2.3.3.1	Características físicas da Areia Verde.....	19
2.3.3.2	Potenciais contaminantes da Areia Verde.....	21
2.3.4	Reutilização da Areia Descartada de Fundição - possíveis aplicações.....	26
2.3.5	Fatores que impedem a reutilização da Areia Descartada de Fundição no Brasil.....	32
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
3.1	ESTUDO DE CASO.....	35
3.2	FUNDIÇÃO TUPY S.A .....	35
3.3	OBTENÇÃO DA AMOSTRA.....	36
3.4	ELEMENTOS TRAÇOS DETERMINADOS .....	36
3.4.1	Técnica de Medição.....	36
3.4.2	Método de digestão da amostra sólida.....	37
3.4.3	Lixiviação da Amostra.....	38
3.4.4	Método para determinação dos metais no lixiviado.....	38
3.4.5	Comparação dos resultados da amostra sólida .....	39
3.4.6	Comparação dos resultados da amostra lixiviada.....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>42</b>
4.1	CONCENTRAÇÃO TOTAL DE ELEMENTOS TRAÇOS NA AMOSTRA SÓLIDA .....	42
4.2	ELEMENTOS TRAÇOS NA AMOSTRA LIXIVIADA .....	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES OBTIDAS</b> .....	<b>50</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES .....	51
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>52</b>



# 1 INTRODUÇÃO

A indústria de fundição possui grande importância na economia mundial e brasileira, fornecendo seus produtos a diversos setores, com destaque para o automotivo. Há muitas técnicas de fundir peças metálicas, a mais disseminada é a que utiliza moldes com a chamada areia verde.

A grande problemática deste setor é a areia descartada do processo de fundição (ADF), que é gerada em grandes volumes, e há a exigência por conta dos órgãos regulamentadores de disposição em aterros industriais, o que gera gastos significativos para as indústrias.

A norma NBR 15702:2009 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT permite a alternativa de aplicação desta areia em asfalto e em camadas de aterros sanitários (ABNT, 2011). Segundo a Associação Brasileira de Fundição – ABIFA (2008) há grande interesse tanto dos órgãos competentes quanto das indústrias em viabilizar diferentes formas de reutilização da areia descartada deste processo industrial, o que, a exemplo de outros países é algo viável de ser realizado.

Para isto, o primeiro passo a ser tomado é a caracterização deste resíduo e identificação de todos os contaminantes existentes através de uma metodologia de ensaios de acordo com as normas regulamentadoras.

Entre os contaminantes encontrados, há a presença de elementos metálicos, transferidos para a areia durante a fusão dos metais. Nesse sentido o foco deste trabalho é investigar a presença de metais e ainda, avaliar a possibilidade de reutilização deste resíduo e seus possíveis efeitos negativos na saúde e meio ambiente. Para a realização dos ensaios foi utilizada amostra proveniente de uma indústria com sede no estado de Santa Catarina: a Fundição Tupy S.A.

Inicialmente foi elaborada uma revisão sobre a importância econômica da fundição de metais, e a geração de contaminantes ao longo do processo. Em seguida foi analisada a problemática da areia descartada de fundição, bem como a gestão de soluções, mais especificamente a reutilização deste resíduo.

O estudo de caso realizado aplicou metodologias regulamentadas, que determinaram a presença de metais em amostra sólida e lixiviada. Com os resultados obtidos, verificou-se em como a presença ou não

destes elementos implica numa possibilidade de reúso a partir do ponto de vista dos efeitos e riscos provocados para a saúde e meio ambiente.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a presença de elementos traços presentes em amostra de areia verde de fundição.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- » revisar as possibilidades de reutilização para as ADF;
- » medir a concentração de alguns metais presentes em uma amostra da Fundição Tupy S.A como estudo de caso;
- » comparar resultados com a legislação e literatura pertinente a fim de verificar se há possibilidade de riscos para saúde e meio ambiente.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

As areias descartadas de fundição podem conter elementos metálicos que provocam impactos negativos para a saúde e meio ambiente. A caracterização química dessas areias é um ponto crítico que tem que ser cumprido para uma maior aceitação de programas de reutilização.

Determinando as propriedades físicas e os contaminantes presentes, bem como seus efeitos é que se torna possível a identificação de todos os tipos de aplicação deste resíduo. A reutilização de ADF pode acontecer em atividades tais como: fabricação de concreto, construção civil em geral, material para construção, cobertura de aterros

e na preparação de solos manufaturados para usos agrícolas e horticulturas.

A areia verde de fundição ferrosa é o tipo de areia descartada que é produzida em maior volume no mundo e no Brasil. O presente estudo, com a proposta de determinar alguns metais presentes neste resíduo se insere no conjunto de medidas que devem ser tomadas para viabilizar tecnicamente e legalmente a reutilização da mesma.

A reutilização em aplicações alternativas ao descarte em aterros industriais é um meio efetivo de reduzir a contaminação no meio ambiente e extração de matérias-primas virgens. Indústrias de fundição e possíveis usuários também são beneficiados, uma vez que o resíduo de um passa a ser matéria-prima de outro.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO

O processo de fundição consiste na fusão de um metal que, em estado líquido, é vazado em um molde, e ao solidificar-se gera uma peça com o formato desejado. A indústria de fundição é um segmento da economia que se caracteriza pela produção de bens intermediários, fornecendo em sua maioria, peças fundidas a diversas outras indústrias (BIOLO, 2005).

No processo de fundição são utilizados rejeitos metálicos, constituídos de sucatas provenientes de estamparias, cutelarias, forjarias e até mesmo sucatas geradas pela obsolescência de equipamentos (BIOLO, Op. cit.). Dependendo do tipo de metal vazado, as fundições são classificadas em ferrosas e não-ferrosas (alumínio, cobre, latão, bronze). A produção brasileira concentra-se em ligas ferrosas correspondendo a 90% dos fundidos produzidos (CASTRO et al., 2010).

No entanto, a indústria de fundição é considerada uma atividade altamente poluidora em função dos grandes volumes de resíduos sólidos gerados, sendo a areia descartada de fundição (ADF) o principal deles.

Há muitas técnicas de fundição de metais, sendo que o molde utilizado pode ser permanente ou não permanente (MOREIRA, 2004). Os tipos de moldes permanentes são sempre metálicos e não são destruídos após cada vazamento. Este processo permite uma produção em larga escala, possibilitando a fabricação de peças em série. Exige, entretanto, um investimento inicial muito elevado (MOREIRA, Op. cit.).

Já os moldes não permanentes são destruídos após o vazamento do fundido para a retirada do mesmo, e neste caso, é utilizada areia como material refratário constituinte predominante (MOREIRA, Op. cit.). A areia utilizada na produção dos moldes é descartada constituindo então, a areia descartada de fundição.

Dependendo da composição, há dois tipos de ADF: as areias verdes e as areias ligadas quimicamente. O método mais tradicional de fundição de metais ferrosos no Brasil envolve o uso de moldes não permanentes confeccionados com areia verde, que será o foco deste trabalho.

### 2.1.1 A Produção Global de Fundidos

Pode-se perceber através da Figura 1 que desde 2006, a produção global de fundidos tem alcançado valores superiores a 90 milhões de toneladas, com exceção do ano de 2009, cuja produção foi de 80 milhões, em razão da crise financeira internacional eclodida no fim de 2008 (MODERN CASTING, 2010).

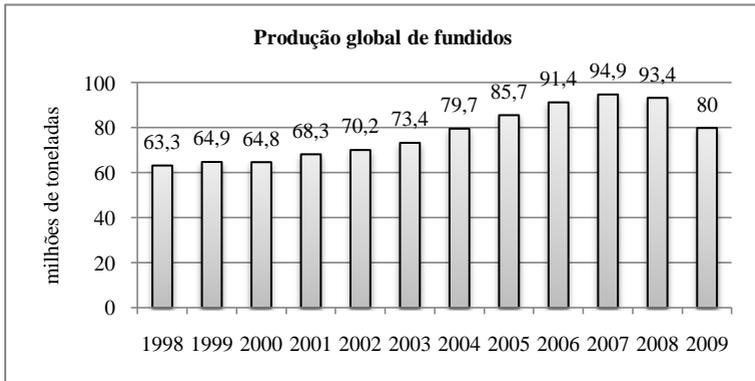


Figura 1 – Produção Global de fundidos

Fonte: Modern Casting, 2010

É notável o crescimento da produção de fundidos em mercados emergentes. Essa é uma tendência natural, advinda do crescimento dessas economias e das maiores pressões ambientais nos países desenvolvidos, que forçam a transferência da produção poluidora para países em que a legislação ambiental é menos restritiva (CASTRO et. al, 2010).

Desde 2007, mais de um terço da produção mundial de fundidos vem da China, que se destaca como a maior produtora mundial, com larga vantagem em relação aos Estados Unidos e à Rússia – respectivamente, segundo e terceiro colocados, como se pode perceber na Figura 2 (MODERN CASTING, Op. cit.). Os fundidos são utilizados, principalmente, na infraestrutura, na siderurgia e na indústria automotiva, setores que cresceram aceleradamente na China, na última década (CASTRO et. al., Op. cit.).

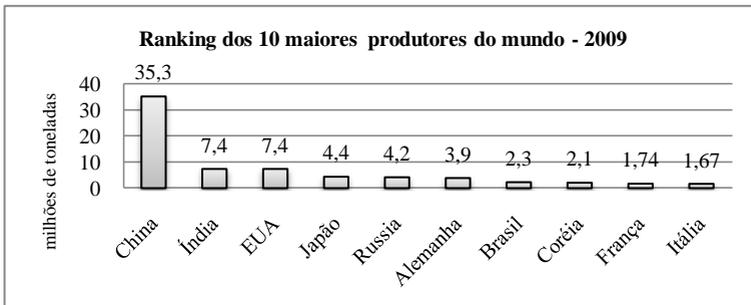


Figura 2 – Ranking dos 10 maiores produtores do mundo  
 Fonte: Modern Casting, 2010 (adaptado)

### 2.1.2 A Produção Nacional de Fundidos

O Brasil ocupava até 2009 o 7º lugar mundial de produção de fundidos, com 2,3 milhões de toneladas, o que indica uma relevância do mercado brasileiro no cenário internacional (CASTRO et al., 2010).

Globalmente, a indústria automotiva é a maior cliente do setor de fundição, representando cerca de 40% das vendas. No Brasil, a indústria automotiva responde por 58% das vendas dos fundidos em geral, chegando a 75% quando se analisa apenas a venda de fundidos em alumínio. Outro setor de destaque é o de bens de capital, com o consumo de 13% de toda a produção nacional de fundidos (CASTRO et al., Op. cit.).

O intenso emprego de mão-de-obra (característica da indústria de fundição) e a autossuficiência em matérias-primas são fatores que contribuem para que o Brasil tenha independência do mercado externo, gerando um número significativo de empregos diretos e indiretos no país. (CARMELIO et al., 2009 apud FAGUNDES, 2010).

Em 2009, o Brasil tinha 1.331 fundições (90% delas micro, pequenas e médias empresas) (ABIFA, 2011a). A ABIFA congrega 550 dessas empresas, que respondem por mais de 95% da produção nacional. Segundo dados da ABIFA, a produção do mês de Abril de 2011 foi de 297.503 toneladas de fundidos. Estima-se que até o final do ano a produção nacional será de 3,5 toneladas (ABIFA, Op. cit.).

## 2.2 O PROCESSO DE FUNDIÇÃO

A escolha do processo é fundamental na definição do grau de precisão dimensional, do acabamento e das propriedades mecânicas da peça que se pretende fabricar. O processo que utiliza moldagem em areia verde é largamente empregado na indústria, dada a sua simplicidade tecnológica, o baixo custo e a facilidade de recuperação da areia. Entre as principais etapas do processo, Castro et. al, (2010) descreve as seguintes:

*Confecção do molde.* O molde é o dispositivo no qual o metal fundido é despejado e cuja cavidade tem formato similar ao da peça final. Feito em material refratário, o molde deve ser capaz de resistir às altas temperaturas dos metais líquidos.

*Confecção do macho, massalotes, respiros e canais de vazamento.* Os machos são colocados nos moldes antes que estes sejam fechados para receber o metal líquido. Diferentemente do molde, que é uma peça que delimita as partes externas da peça fundida, o macho é uma peça que delimita as partes internas (vazios). Durante o vazamento, o macho fica completamente envolto em metal líquido.

Posto que o metal se contrai durante a solidificação, é necessária a construção de reservatórios com metal líquido para compensar a contração. Tais reservatórios são denominados massalotes e, quando mal dimensionados, podem causar um vazio na peça.

Também é necessária a confecção de respiros (canais para a saída do ar e dos gases de combustão da resina da areia durante o vazamento no molde) e canais de vazamento (dutos que levam o metal despejado da panela de vazamento até o interior do molde).

*Fechamento do molde.* O molde é composto de duas metades, sendo o macho colocado no interior da primeira e fechado pela segunda. Nessa fase, é fundamental garantir a limpeza dos moldes, para que não haja inclusão de outros materiais no metal, o que poderia comprometer a resistência da peça.

*Fusão.* Nessa fase, o metal é fundido em um forno de indução. As variáveis mais importantes desse processo são a temperatura do forno, a composição química do fundido e a correção da mesa, caso necessário.

*Vazamento.* O metal líquido é transferido do forno para a panela de vazamento, que despejará o metal no molde. As principais variáveis nessa fase são a limpeza da panela, a temperatura e a velocidade de vazamento. Uma velocidade muito alta pode provocar erosão da areia e inclusão de grãos na peça.

*Desmoldagem.* Operação de retirada da peça sólida de dentro do molde. É importante controlar a temperatura em que a operação é feita, para evitar choque térmico e consequentes trincas na peça.

*Corte de canais e massalotes.* Remoção do metal excedente que ficou nos canais e nos massalotes. Essa remoção pode ser feita com corte por disco abrasivo ou por fusão localizada.

*Rebarbação e limpeza.* Após o corte dos canais e massalotes, essas áreas precisam de acabamento superficial. É necessária a retirada de incrustações de areia do molde na peça fundida. Essa limpeza é feita, em geral, com jatos abrasivos.

*Inspeção e recuperação.* Por fim, marcam-se os defeitos da peça durante ensaios de inspeção visual, líquido penetrante, ultrassom ou radiografia. Em seguida, testam-se as propriedades físicas e mecânicas do material. Os defeitos são removidos e reparados por solda (com exceção dos ferros fundidos, que não admitem recuperação por solda) para serem novamente inspecionados.

### **2.2.1 Geração de Resíduos**

Os resíduos gerados e eliminados nas diversas etapas do processo de fundição (Figura 3). São constituídos basicamente de escórias, poeiras diversas, areia descartada, entre outros (WINKLER et al., 2000).

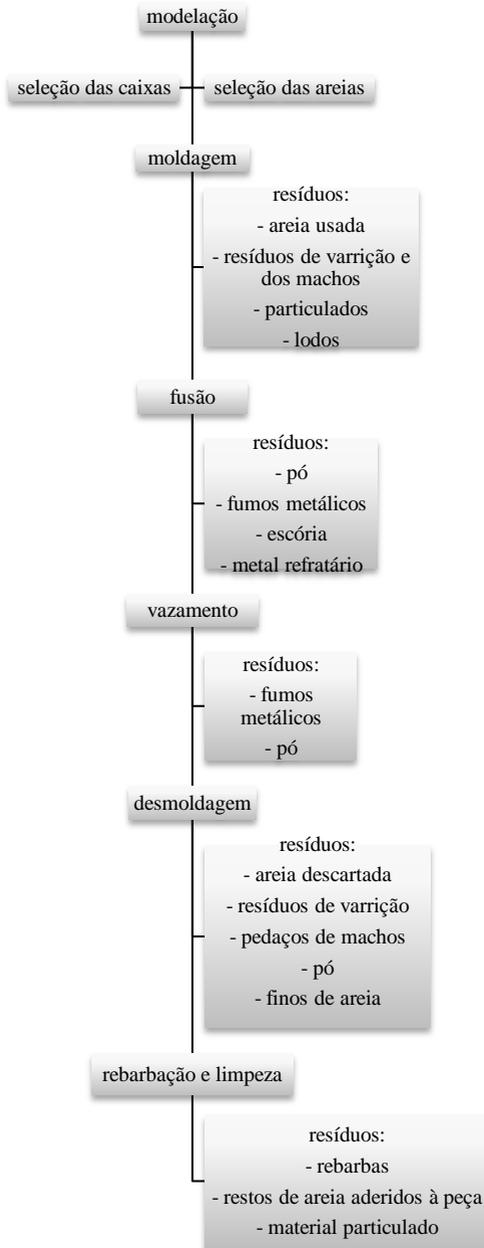


Figura 3 – Fluxograma de saídas do processo de fundição.

Fonte: OLIVEIRA, 1998 apud CHEGATTI, 2004; QUISSINI, 2009 (adaptado)

A areia descartada, estudada adiante, corresponde ao maior volume de resíduos produzidos (cerca de 70% do total). Esta areia normalmente é regenerada e recirculada no processo produtivo, até o momento que deve ser descartado (BIOLO, 2005).

Os efluentes líquidos são provenientes da água de refrigeração e, eventualmente, dos sistemas para redução de emissões gasosas (lavadores por via úmida), do serviço de limpeza e outros processos de manutenção e prevenção. Os volumes destes efluentes são relativamente pequenos e não causam grandes preocupações ambientais (IFC, 2007).

A poluição atmosférica das indústrias é composta por material particulado e vapores tóxicos dos fornos. A qualidade do ar numa fundição é um fator de grande preocupação. Para isso utilizam-se sistemas de tratamento que incluem lavagem por via úmida, absorção, adsorção e filtros de manga (IFC, Op. cit.).

### 2.3 AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO

Areia descartada de fundição detém um dos maiores volumes de produção de resíduos sólidos no mundo. A ADF não é um resíduo uniforme, e as questões relacionadas à contaminação variam espacialmente e temporalmente. A variação espacial é devida às diferenças de procedimentos e processos de fundição que se alteram de uma empresa para outra. Variações temporais ocorrem no mesmo local devido a alterações no próprio processo de fundição (OWENS, 2008).

Basicamente, os principais componentes da ADF são:

- **Areias-base:** a areia-base é o item presente em maior porcentagem. São granulados de origem mineral formados pela fragmentação de rochas. A composição química dos grãos varia de acordo com a rocha original, a forma como ocorreu a deposição e as condições climáticas que envolveram todo o processo. (FERNANDES, 2001 apud FAGUNDES, 2010).
- **Aditivos:** são produtos adicionados à mistura das areias com o propósito de lhes conferir melhores propriedades. Podem ser de dois tipos: orgânicos e inorgânicos. Dentre os aditivos orgânicos destacam-se os carbonáceos (pó de carvão mineral, piche e produtos afins), celulósicos (pó de madeira) e, amiláceos e dextrinas (produtos a base de amido). Os aditivos inorgânicos constituem-se de pós de materiais naturais ou sintéticos, sendo os

mais comuns o óxido de ferro e o pó de sílica. (SCHEUNEMANN, 2005).

- Aglomerantes/ligantes: são produtos químicos que conferem às areias a resistência necessária e suficiente para as etapas do processo de fundição (BINA, 2002).

De acordo com os aglomerantes utilizados, as areias descartadas de fundição distinguem dois tipos básicos: as areias de moldagem (a mais comum é chamada de areia verde) e as areias ligadas quimicamente ou de macharia (utilizadas para produzir machos). A diferença entre os dois tipos é que a areia verde utiliza ligantes inorgânicos (principalmente a base de argila) e as areias ligadas quimicamente que utilizam resinas orgânicas, normalmente a base de álcool furfúrico e fenol formaldeído (CARNIN, 2008).

Usualmente, a composição da areia verde consiste em 85-95% de sílica proveniente da areia-base, 4-10% de argila, 2-10% de aditivos carbonáceos e 2-5% de água. A areia à base de sílica resiste a altas temperaturas, enquanto a argila une os grãos de areia e a água fornece plasticidade. Os aditivos carbonáceos servem para prevenir a fusão da areia sobre a superfície de fundição. As areias verdes geralmente são pretas, devido à presença do carbono (SIDDIQUE e NOUMOWE, 2008).

Na produção dos machos é necessária uma capacidade maior de resistir às altas temperaturas, por isto, quanto à composição, as areias ligadas quimicamente são constituídas normalmente, 93-99% de sílica e 1-3% de ligantes orgânicos (FIRST, 2004). Geralmente, a areia ligada quimicamente possui cor mais suave que a verde, variando de tons acinzentados a bege (SIDDIQUE e NOUMOWE, Op. cit.).

A composição química da ADF depende do tipo de metal que é fundido e do tipo de aglomerante utilizado. Dependendo do tipo de ligante utilizado, o pH da ADF pode variar entre 4 e 8 (JOHNSON, 1981 apud SIDDIQUE e NOUMOWE, Op. cit.).

Devido à presença do fenol há certa preocupação na percolação do resíduo, que pode mobilizar frações lixiviáveis resultando na contaminação de águas subterrâneas (JOHNSON, 1981 apud SIDDIQUE e NOUMOWE, Op. cit.).

Lixiviado é o líquido de resíduos industriais ou subprodutos que contém materiais suspensos ou dissolvidos de ambos. Pode ser caracterizado como uma solução aquosa com quatro grupos de contaminantes; orgânicos dissolvidos (alcoóis, ácidos, aldeídos, etc.), macro componentes inorgânicos (cátions e ânions comuns incluindo sulfato, cloreto, ferro, alumínio, zinco e amônia), metais pesados

(chumbo, níquel, cobre e prata) e componentes orgânicos xenobióticos como orgânicos halogenados (SIDDIQUE et al., 2010).

É exigida pelos órgãos regulamentadores a disposição da areia descartada de fundição em aterros industriais. Considerando o grande volume produzido, esta não é melhor solução. O espaço necessário para o aterro é cada vez mais escasso e afastado dos centros industriais, implicando numa logística de transporte complexa e onerosa.

Há empresas que implantam aterros no próprio terreno, como no caso da Fundação Tupy S.A, eliminando os custos com o transporte. Entretanto, a vida útil destes nunca será muito elevada, pois, conforme mencionado, a quantidade de areia descartada é muito grande.

Além disso, o controle do lixiviado no aterro é de responsabilidade da empresa geradora, o que acarreta em custos significativos à mesma. Sem contar que, o próprio aterro industrial não deixa de ser um passivo ambiental<sup>1</sup>, provocando a desertificação de áreas produtivas, de proteção ambiental ou de preservação (ABIFA, 2008).

Por conta disso, há um crescente interesse em estudar maneiras para possibilitar o aproveitamento e valorização da areia descartada de fundição, proporcionando uma minimização dos impactos, e, economia para a indústria (ABIFA, 2008).

### **2.3.1 Gestão de Soluções**

A gestão dos procedimentos para solução das ADF deve ser encarada com a mesma seriedade com que são aplicadas as outras atividades tais como qualidade, produção e comercial no que tange ao desenvolvimento tecnológico, processos, objetivos e metas. Soluções devem ser buscadas na seguinte ordem (ABIFA, 2008):

- a.Utilização máxima do material dentro do sistema;
- b.Regeneração mecânica;
- c.Regeneração térmica;
- d.Reutilização como subproduto em outras aplicações;

---

<sup>1</sup>Passivo ambiental: “toda agressão que se praticou/pratica contra o meio ambiente e consiste no valor dos investimentos necessários para reabilitá-lo, bem como multas e indenizações em potencial” (Instituto Dos Auditores Independentes do Brasil, (data não informada)).

- e. Destinação para áreas de processamento que possibilitem a reutilização futura;
- f. Destinação para aterros definitivos exclusivos de ADF;
- g. Destinação para aterros classe IIA (resíduos não inertes) misturando com outros resíduos industriais.

A Figura 4 mostra o fluxograma processo de fundição com as respectivas etapas de recuperação, regeneração e destinação para reutilização esquematizadas.

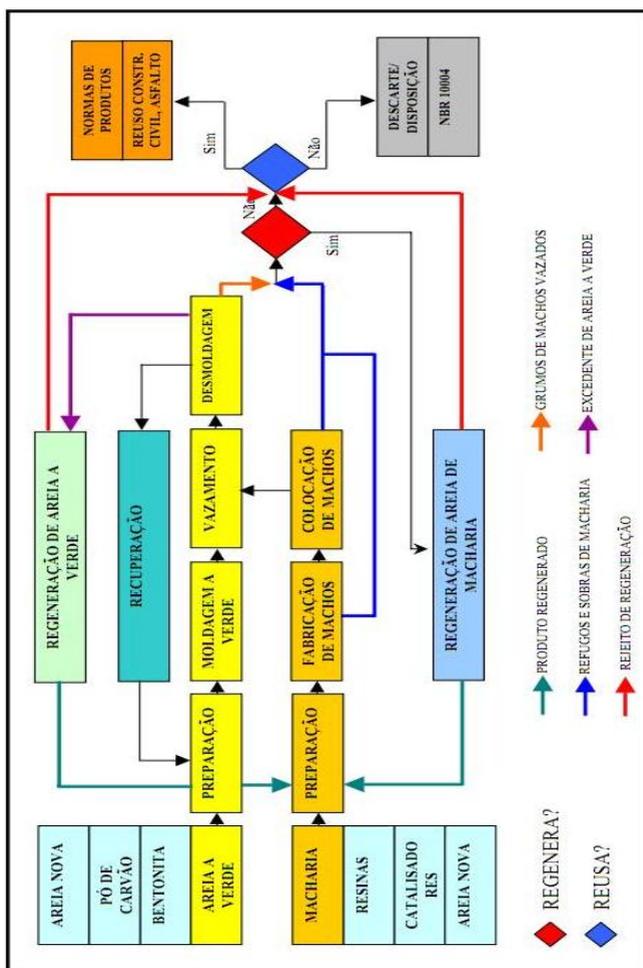


Figura 4 – fluxograma do processo de fundição - soluções  
Fonte: PEIXOTO, 2003

A utilização máxima do material dentro do sistema se dá através da recuperação ou recirculação da areia, que consiste na reintrodução das já utilizadas no processo produtivo original. Depois de feita a desmoldagem a areia é esfriada, retira-se uma porcentagem contaminada por finos e materiais metálicos (porcentagem essa que varia de acordo com as características do processo) e é acrescentada areia nova à mistura na mesma proporção inicial a fim de manter a qualidade dos machos e moldes produzidos (QUISSINI, 2009).

A regeneração de uma areia de fundição implica na limpeza superficial de seus grãos através de processos específicos com o objetivo de tornar a areia novamente em condições de uso, permitindo a sua reutilização no processo (BIOLO, 2005). Muitas indústrias de fundição utilizam o processo de regeneração para reciclar as ADF. Este processo é indicado somente para alguns tipos de ADF, especialmente para aquelas com resina (SHEUNEMANN, 2005).

A reutilização ou reúso, objeto de estudo deste trabalho, está relacionada com a utilização das areias de fundição descartadas como subproduto em aplicações externas à indústria de fundição (BIOLO, Op. cit.). A reutilização de ADF pode acontecer em atividades tais como: fabricação de concreto, construção civil em geral, material para construção, cobertura de aterros e na preparação de solos manufaturados para usos agrícolas e horticulturas (ABIFA, 2011a).

É necessário que as fundições garantam a constância da qualidade das ADF fornecidas à reciclagem externa, mantendo dentro de determinados limites as características exigidas especificamente para cada tipo de aplicação. Atenção especial deve ser dada aos métodos de reúso, pois o domínio do conhecimento acerca dos impactos ambientais potenciais acarretará em maior precisão na determinação das possíveis aplicações para as ADF, podendo aumentar a confiabilidade da atividade com relação à sua segurança ambiental (ABIFA, Op. cit.).

### **2.3.2 Normas e Regulamentações Referentes à Areia Descartada de Fundição**

Os resíduos sólidos em geral são definidos pela ABNT NBR 10004:2004 como sendo os que se encontram no estado sólido ou semi-sólido, resultantes de atividades de cunho industrial, doméstico, hospitalar, comercial e agrícola, bem como, de serviços e de varrição. Esses resíduos são classificados como perigosos quando suas

características proporcionam riscos à saúde dos seres humanos ou acarretam riscos ao meio ambiente quando gerenciados de forma imprópria.

No Brasil, seguem as seguintes normas de definição, procedimentos e métodos de ensaios:

a. NBR 10004 – Classificação dos Resíduos Sólidos

Esta norma procura classificar os resíduos, quanto a sua potencialidade de agressão ao meio ambiente e à saúde pública, sendo assim são definidos dois grupos de resíduos (NBR 10004:2004):

- Classe I (Resíduos Perigosos):

Resíduo que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas (inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade), pode apresentar risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices, e riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

- Classe II (Resíduos Não Perigosos)

Divide-se em duas classes:

Classe II-A (Resíduos não Inertes): podem ter propriedades como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Classe II-B (Resíduos Inertes): são aqueles que, amostrados de forma representativa e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores a padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Para análises químicas devem ser usados os métodos da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – U.S. EPA (*United States Environmental Protection Agency*) - SW 846, última edição e, quando disponíveis, os métodos nacionais equivalentes elaborados pela ABNT.

As normas SW-846, criadas pela EPA, representam um conjunto de mais de duzentas determinações para avaliação de resíduos sólidos industriais, resíduos sólidos urbanos, águas superficiais salinas e subterrâneas e solo (EPA, 2011).

b. NBR 10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos

Esta Norma fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados pela ABNT NBR 10004 como classe I – perigosos - e classe II – não perigosos (NBR 10005:2004).

c. NBR 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos

Esta Norma fixa os requisitos exigíveis para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados na ABNT NBR 10004 como classe II A – não inertes e classe II B – inertes (NBR 10006:2004). O ensaio de solubilização é um parâmetro complementar ao ensaio de lixiviação.

Dentro dessa classificação, os excedentes de areias de fundição enquadram-se geralmente na classe II-A, devido à presença de ligantes químicos e metais (ABIFA, 1999 apud FAGUNDES, 2010).

d. NBR 10007 – Amostragem de Resíduos sólidos

Esta Norma fixa os requisitos exigíveis para amostragem de resíduos sólidos (NBR 10007:2004).

e. NBR 15702 – Areia descartada de fundição – Diretrizes para aplicação em asfalto e em aterro sanitário

Em virtude da problemática acerca do trato e disposição dos excedentes de areias de fundição e da falta de legislação específica para o setor, a ABIFA criou em setembro de 2007 junto à ABNT (único foro de normalização do país), o Comitê Brasileiro de Fundição ABNT/CB-59, tendo como âmbito de atuação a “normalização no campo da fundição compreendendo fundição de ferro, de aço e de não ferrosos, insumos, matéria-prima, resíduos no que concerne a terminologia, requisitos, métodos de ensaio e generalidades” (ABNT, 2008).

No âmbito dos Resíduos de Fundição (59:001) foi instalada a Comissão de Estudos Resíduos de Fundição ADF (59:001.01), tendo como escopo a “normalização referente aos resíduos de fundição no que concerne a tratamento, utilização, reaproveitamento, armazenamento e transporte”, que gerou inicialmente dois projetos de estudo sobre as areias descartadas de fundição (FAGUNDES, 2010).

A norma NBR15702:2009 define as condições a serem obedecidas (classificação do resíduo, concentrações máximas de alguns

elementos químicos em ensaios determinados, obtenção de autorizações ambientais junto aos órgãos competentes, entre outras), as documentações a serem geradas e os procedimentos a serem executados por todos os envolvidos: geradores (utilizadores de areias em seus processos de fundição), gestores (responsáveis por receber, beneficiar ou não, e dar destinação de reciclagem ou reutilização às ADF) e usuários (responsáveis por receber, reciclar ou reutilizar as ADF) (ABNT, 2008).

A Comissão de Estudos de Resíduos de Fundição finalizou o segundo projeto, sob o número 59:001.01-002, intitulado “Areia descartada de fundição – Central de processamento, armazenamento e destinação final – CPAD”. Esta norma tem como objetivo estabelecer as diretrizes para projeto, construção e operação das áreas para receber, processar, armazenar e destinar as areias descartadas de fundição para reúso, reciclagem ou disposição; e fornecer também condições para boas práticas de gestão das areias descartadas de fundição, sem interferir na opção de destinação diretamente para aterros licenciados (ABIFA, 2011b).

Outro projeto em estudo dessa Comissão é o Guia de Referência ambiental para reúso da areia descartada de fundição. Este projeto estabelecerá padrões de referência para as areias descartadas de fundição para aplicações gerais e complementarará a NBR15702:2009 (ABIFA, Op. cit.).

### 2.3.2.1 Legislação Norte-Americana

A NBR 10004:2004 é baseada no Código Federal de Regulamentações dos Estados Unidos – CFR – *Title 40 – Protection of environmental – Part 260-265 – Hazardous waste Management* (NBR10004:2004). No CFR-40 da EPA encontra-se a coletânea de todos os métodos e ensaios para as análises químicas e físicas requisitados nos Estados Unidos, entre elas, as normas presentes no SW-846.

A NBR 10005:2004 é baseada no Método de lixiviação 1311, pertencente às SW-846 (NBR10005:2004). Este método é intitulado TCLP – *Toxicity Characteristic Leaching Procedure*.

Por conta disto, e pelo fato de os Estados Unidos ser o país mais desenvolvido no campo da reutilização (SILVA, 2007), buscou-se

apontar as principais questões acerca dos aspectos normativos deste país envolvendo o reúso de ADF.

Em função da organização Estatal, há algumas incoerências regulamentares neste país. Alguns Estados-membros possuem requisitos genéricos para todos os resíduos industriais, enquanto outros desenvolveram orientações específicas considerando as áreas de fundição (EPA, 2002).

Ponderando questões como: Estados que tinham maior número de fundições, e os que possuíam programas de reutilização de resíduos industriais ativos, a EPA elaborou em 2002 um estudo envolvendo 18 (dezoito) Estados americanos, a fim de obter uma visão geral do quadro de regulamentação e incentivar o reúso da ADF. Destes, seis – Illinois, Indiana, Iowa, Ohio, Tennessee e Wisconsin – haviam desenvolvido regras e políticas específicas para a reutilização das ADF (EPA, Op.cit.).

Entre os requisitos em comum nesses Estados, destacam-se os testes de caracterização do resíduo. O ensaio de lixiviação TCLP é estabelecido por todos, e para Wisconsin também é exigida a análise total da ADF. Os limites de concentração variam de Estado para Estado, e envolvem os estabelecidos pelo *Resource Conservation and Recovery Act* – RCRA e o *Drinking Water Standards* – DWS. O RCRA é a principal lei federal nos Estados Unidos que rege a disposição de resíduos sólidos, e o DWS se refere aos padrões de potabilidade de água (OWENS, 2008).

O Quadro 1 apresenta as características dos programas de reutilização de ADF dos seis Estados americanos citados anteriormente.

Estado	Teste exigido		Limites de Concentração	Categorias de classificação
	Lixiviação	Total		
Illinois	TCLP	Não	DWS	Sim
Indiana	TCLP	Não	Variável do RCRA	Sim
Iowa	TCLP	Não	90% do RCRA	Não
Ohio	TCLP	Não	30 <sub>2</sub> DWS (Ohio)	Sim
Tennessee	TCLP	Não	10 <sub>2</sub> DWS	Não
Wisconsin	TCLP	Sim	Múltiplo variável do DWS	Sim

Quadro 1 – Características dos programas de reutilização de ADF

Fonte: OWENS, 2008

Com exceção de Tennessee, todos os Estados que possuem programas de reutilização da ADF classificam este resíduo em categorias. O sistema de classificação é baseado na qualidade da areia. A ideia é a de que deve haver menor restrição no reúso quando na fabricação de outro produto (por exemplo, cimento), pois dessa forma, há um menor potencial de impactos ambientais adversos. Por outro lado, aplicando a ADF em solos agrícolas deve haver maior restrição, pois há maior potencial de impactos no meio ambiente e saúde humana via exposição direta ou indireta através alimentos cultivados utilizando este solo (OWENS, 2008).

Às agências reguladoras cabe desenvolver tabelas de constituintes baseados nas concentrações totais ou lixiviáveis, e associá-los a níveis seguros de reúso. Uma vez estabelecidos, cabe ao fabricante entrar em conformidade com os regulamentos através de testes para certificação. Isto é fundamental para estabelecer os tipos de componentes que devem ser detectados e a magnitude dos valores a fim de assegurar a proteção ambiental e a saúde humana (OWENS, Op. cit.).

### **2.3.3 Caracterização da Areia Verde de Fundição**

As aplicações de um material estão diretamente ligadas às suas propriedades físico-químicas. Areias verdes devem possuir diversas qualidades para serem reutilizadas. Elas devem ser ambientalmente benignas: não devem lixiviar metais, alcalinos, ou orgânicos em quantidades que possam ser nocivas a saúde humana e meio ambiente. Devem ser economicamente favoráveis e, devem ser tecnicamente equivalente ao material que está substituindo (WINKLER et al., 2000).

#### **2.3.3.1 Características físicas da Areia Verde**

Quantificações precisas das propriedades físicas são importantes para a valorização de mercado. A Tabela 1 traz referências sobre as características físicas e geotécnicas das areias verdes.

Tabela 1 – Características físicas e geotécnicas das areias verdes

Características	Valores
Umidade	3-5%
Peso seco	110-115 (pcs)
Umidade ótima	8-12%
Coefficiente de permeabilidade	$1,8 \times 10^{-8} - 9,5 \times 10^{-9}$ cm/s
Limite de plasticidade	Em alguns casos não plásticas
Teor de bentonita	2-13%
Massa específica	2,50-2,73 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: QUISSINI, 2009

O índice de plasticidade é comumente usado para indicar a tendência do solo em sofrer mudanças de volume (contração ou inchaço). As ADF são tipicamente não-plásticas, porém a presença da bentonita confere maior plasticidade para as areias verdes. O índice de plasticidade geralmente é inferior a 2 (dois) para areias verdes com pouco ou sem teor de finos, e maior que 2 (dois) quando a quantidade de argila é maior que 6% (FIRST, 2004).

Teor de umidade e granulometria são as características mais importantes para reúso da areia descartada. Geralmente as areias verdes apresentam umidade muito baixa e ausência de compostos orgânicos em função das altas temperaturas do processo produtivo (QUISSINI, 2009).

A granulometria da areia verde normalmente é uniforme, com 85-95% do material entre 0,6 e 0,15 mm, e 5 a 15% das partículas podendo ser menor que 0,075 mm (SIDDIQUE e NOUMOWE, 2008). Essa uniformidade do tamanho dos grãos garante boa fluidez. A granulometria da areia influencia muitas propriedades do material. Os efeitos mais notáveis são a permeabilidade e finura superficial, ambas associadas com propriedades de resistência (WINKLER et al., 2000).

A classificação da areia verde, segundo o sistema de classificação unificada dos solos, pode ser SP (areia mal graduada), SM (solo siltoso) ou SPSM e pelo Sistema Rodoviário de Classificação com A-3 (areias finas), A-2-4 (Diâmetros de partículas menores que 2,0 mm) (QUISSINI, Op. cit.).

O coeficiente de permeabilidade geralmente é baixo devido à presença da bentonita (QUISSINI, Op. cit.). Areias com menor teor de finos possuem coeficientes de permeabilidades superiores (FIRST, Op. cit.).

As areias verdes também são caracterizadas por possuir boas propriedades de resistência e condutividade hidráulica baixa. (WINKLER et al., Op. cit.). A resistência ao cisalhamento depende de

várias propriedades e é a capacidade do solo de resistir à deformação. Esta propriedade é fundamental na determinação da maior carga que este material pode suportar. O ângulo de atrito de areia verde com argila de 6-12% é maior que areia verde sem argila (FIRST, 2004).

### 2.3.3.2 Potenciais contaminantes da Areia Verde

Testes de laboratório de lixiviação são realizados com frequência para determinar o potencial de contaminação dos resíduos. O nível de importância de qualquer componente de um resíduo que pode ser lixiviado depende da sua constituição e as condições ambientais ao qual é submetido (DUNGAN et al., 2009).

Vários estudos já determinaram o potencial de lixiviação dos constituintes químicos presentes nas areias verdes (bem como outros tipos de ADF) e seus impactos no meio ambiente. A maior parte destes trabalhos mostrou que as areias não provocam contaminação às águas subterrâneas, pois os resultados se encontravam abaixo das concentrações máximas estabelecidas pelos órgãos regulamentadores (DUNGAN et al., Op. cit.).

A NBR 10005:2004, assim como o TCLP, foi elaborada para determinar a lixiviabilidade de compostos orgânicos, inorgânicos (metais) e pesticidas. Com este ensaio, ocorre a simulação de condições encontradas em aterros de resíduos sólidos municipais através da solução de extração contendo ácido acético glacial, que no caso, seria a água da chuva que infiltra no solo (DUNGAN et al., Op. cit.).

Para reutilização da areia em aplicações no solo e horticultura este ensaio pode ter relevância limitada, pois nestes casos, as areias não seriam expostas a este ácido ou água com pH levemente baixo (ácida) (DUNGAN et al., Op. cit.). De qualquer forma, testes de lixiviação são utilizados para determinar se o resíduo é perigoso ou não perigoso (NBR 10005:2005). Se os resultados obtidos excederem os limites estabelecidos pela regulamentação (Anexo F – NBR 10004:2004) é considerado perigoso. Também se compara os resultados obtidos com os limites de potabilidade da água, pois se supõe que os constituintes presentes no lixiviado são diluídos e atenuados com a infiltração do mesmo.

A determinação da concentração total dos constituintes também é importante na avaliação de risco de contaminação, pois estas concentrações definem a magnitude da exposição, ou seja, dosagem, de

cada componente que pode ser prejudicial ao receptor (homem ou meio ambiente) (DUNGAN et al., 2009).

A caracterização química, portanto, determina os potenciais contaminantes prejudiciais à saúde humana e meio ambiente. Está relacionada com a identificação dos elementos metálicos e componentes orgânicos presentes na areia (WINKLER e BOL'SHAKOV, 1999).

## 1) Orgânicos

Os contaminantes orgânicos são produtos advindos da decomposição térmica, e são gerados quando o metal derretido entra em contato com os aditivos carbonáceos e resinas ligantes (BIOLO, 2005).

Um dos maiores desafios em determinar os contaminantes orgânicos presentes nas ADF está em identificar a composição exata dos sistemas ligantes utilizados. Outro problema é a possível alteração da composição original dos aglomerantes durante o processo de fundição (OWENS, 2008).

A temperatura é um dos fatores determinantes, sendo que a maioria dos resíduos orgânicos é completamente destruída. No entanto, em fundições com temperaturas menores, uma proporção significativa de contaminantes de ligantes orgânicos (areias ligadas quimicamente) pode ser mantida (OWENS, Op. cit.). É o caso de fundições não-ferrosas de alumínio, que não é objeto de estudo deste trabalho.

Comparando-se com areias ligadas quimicamente, a areia verde apresenta um baixo potencial de contaminação na lixiviação (FIRST, 2004). Apesar de haver uma grande quantidade de contaminantes orgânicos, em termos legislativos os de maior preocupação são os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP), tais como – fenantrenos, naftalenos, fluoreno, antraceno e pireno, e fenóis, a exemplo – fenol, 2-metilfenol, 3 e 4-metilfenol, e 2,4-dimetilfenol (OWENS, Op. cit.).

Para o estudo de areias verdes não há grande interesse em determinar os contaminantes fenólicos, pois estes são provenientes da decomposição térmica das resinas de areias ligadas quimicamente, e só poderão estar presentes em areia verde numa ocasional mistura com as areias de macharia na etapa de desmoldagem.

HAP corresponde a um grupo de algumas centenas de hidrocarbonetos que contêm pelo menos dois anéis aromáticos, dos quais dezenas de tipos foram escolhidas como referência tóxica (JI et al., 2001).

Ji et al. (2001) realizaram um estudo de análise química de quatro tipos de areias (areia verde, areia furano/ácida, areia fenólica e areia de

silicato). Verificou-se que todas as areias descartadas de fundição continham compostos de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, e que o teor de HAP em areias verdes era muito mais elevado que as areias ligadas quimicamente. Naftaleno é o componente mais importante, correspondendo cerca de 30% dos HAP presentes em areia verde. Os tipos de metais fundidos influenciam significativamente os componentes HAP de areias verdes. Fundições ferrosas possuem mais HAP que as de alumínio e aço.

Dungan (2006) realizou um estudo com 43 amostras de ADF, das quais 36 eram areias verdes, de 12 Estados americanos, e constatou que a maioria dos 15 HAP estudados se encontrou abaixo dos limites de detecção do método de análise. Aqueles que possuem 2 ou 3 anéis aromáticos como acenafeno, acenafetileno, antraceno, naftaleno e fenantreno foram a maioria detectada, HAP de 4 anéis se encontravam um pouco acima dos limites de detecção e de 5 e 6 anéis não foram detectados.

As concentrações máximas permitidas pelo Estado de Wisconsin de naftaleno e fenantreno são 600 e 0,88 m.kg<sup>-1</sup> respectivamente, o que indica que apesar da maior concentração de naftaleno nas areias, o fenantreno gera maior preocupação ambiental (DUNGAN, Op. cit.).

## 2) Elementos traços

O termo “elemento traço” é utilizado na literatura científica para designar um número de elementos que ocorrem nos sistemas naturais em pequenas concentrações. Nas definições de muitos dicionários, elementos traços são elementos químicos, especialmente metais, utilizados por organismos em ínfimas quantidades, porém essenciais à sua fisiologia (TIKALSKY et al., 2004).

Entretanto, este termo tem sido utilizado para designar elementos metálicos, que quando presentes em suficientes concentrações em qualquer função fisiológica podem ser tóxicos aos organismos vivos. (BRADFORD et al. 1996 apud TIKALSKY et al., Op. cit.).

Os metais possuem características únicas que devem ser consideradas. Alguns metais (como o cobre, selênio e zinco) são elementos nutricionalmente essenciais em baixos níveis, porém tóxicos em níveis mais elevados. Já outros (como o chumbo, arsênico e mercúrio) não possuem nenhuma função biológica.

A EPA elaborou em 2007 um documento de avaliação de riscos de metais para saúde e meio ambiente, que por sua vez, descreve os

princípios básicos que devem ser considerados neste tipo de análise. Dentre eles destacam-se (EPA, 2007b):

- Metais ocorrem naturalmente no meio ambiente e se encontram em diferentes concentrações dependendo da região geográfica;
- Misturas de metais ocorrem naturalmente em todo o meio ambiente, e são frequentemente lançados no meio ambiente na forma de misturas;
- Alguns metais são essenciais para a manutenção da saúde humana, de animais, plantas e microorganismos;
- Metais não são criados nem destruídos por processos biológicos e químicos. Entretanto, estes processos podem transformar de uma espécie metálica para outra (estados de valência) e podem converter os metais entre as formas inorgânicas e orgânicas;
- A absorção, distribuição, transformação, e eliminação de um metal de um organismo, dependem da forma do metal e da capacidade do organismo para regular e/ou armazenar o metal.

A areia e outros materiais utilizados para criar os moldes contêm níveis naturais de metais, porém durante o processo de fundição, eles também podem ser transferidos para as areias verdes de moldagem. Os contaminantes metálicos presentes em ADF estão relacionados diretamente com o metal que é fundido (DUNGAN et al., 2009).

Nos Estados Unidos, Dungan e Dees, (2008) elaboraram um estudo de caracterização de metais totais e lixiviáveis em 43 amostras areias de moldagem de 37 fundições de todo o país, sendo que 74% das amostras eram areias verdes. Os resultados indicaram que, no geral, os metais não eram de qualquer preocupação ambiental. A presença de elementos traços nos ensaios de lixiviação se encontrava em níveis abaixo dos limites regulamentados, e a concentração total de metais teve resultados iguais ou comparáveis ao nível de metais em solos agrícolas nos EUA. Os metais estudados por Dungan e Dees, (2008) foram prata, arsênio, bário, berílio, cádmio, cromo, cobre, níquel, chumbo, antimônio e zinco (Ag, As, Ba, Be, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Sb, e Zn).

Lee e Benson, (2006), da mesma forma, realizaram testes de lixiviação e análises totais de elementos metálicos. Entretanto, foram utilizadas 12 amostras de areia verde apenas. O objetivo desta pesquisa era avaliar a possibilidade de aplicação do resíduo em barreiras reativas utilizadas para tratar contaminantes de águas subterrâneas com solventes orgânicos no Estado de Wisconsin (EUA).

Os resultados mostraram que nenhum dos materiais satisfaz os critérios estabelecidos pelo Estado de Wisconsin. Concentrações de As, Cd, Mn, Pb, Sb e F das areias verdes excederam os máximos permitidos, apesar de ultrapassar ligeiramente os limites regulamentados. As concentrações de Al excederam os limites para três areias verdes, e a de Fe para dez amostras. As avaliações totais de metais excederam os máximos permitidos para As e Be para todas as areias verdes, com exceção de uma amostra. As concentrações de Cr se encontravam sensivelmente acima do permitido para duas amostras. Além das areias verdes, foram realizados os mesmos ensaios com o ferro granular zero valente (ZVI), material comumente utilizado em águas subterrâneas. No geral, os dados indicaram que apesar de exceder os máximos permitidos, a utilização de areia verde em barreiras reativas não representa nenhum risco maior que ZVI (LEE e BENSON, 2006).

Ji et al. (2001) também investigaram o potencial de lixiviação de alguns metais e identificaram que em todas as ADF a concentração de metais lixiviados foi muito baixa. As características de lixiviação do Cr são dependentes do pH, o que pode ser útil para encurtar o tempo de lixiviação.

No geral, ADF normalmente possuem baixos níveis de contaminantes metálicos, e os metais presentes não impedem a reutilização futura (OWENS, 2008). Os lixiviados destas areias podem conter elementos traços que excedam os padrões de qualidade de água, mas as concentrações não diferem de outros materiais de construção como solos naturais ou cinzas volantes (FIRST, 2004).

Agências de regulamentação ambiental devem orientar o fornecedor de areia de fundição e o usuário através de procedimentos de ensaios aplicável e padrões de qualidade de água. Se for desejada proteção adicional dos lixiviados, métodos mecânicos como compactação podem prevenir e minimizar ainda mais o desenvolvimento de lixiviados. Portanto, fornecedores de areia de fundição irão trabalhar com todos os potenciais usuários para garantir que o produto vá ao encontro das exigências ambientais para as aplicações de engenharia consideradas (FIRST, Op. cit.).

Dependendo do tipo de aplicação utilizado com a reutilização das ADF, o nível de exposição aos metais é variável. As rotas de exposição e as formas podem influenciar o potencial carcinogênico dos metais. A sensibilidade aos metais varia de acordo com a idade, sexo, gravidez, nutrição e fatores genéticos (EPA, 2007b).

Caracterizações químicas são essenciais para determinar o potencial de contaminação. É necessário também estudar os efeitos a

longo prazo sobre a saúde e meio ambiente das práticas de reúso, quantificando e categorizando os potenciais risco das areias em cada uma delas e os diferentes cenários de exposição (WINKLER et al., 2000).

### 2.3.4 Reutilização da Areia Descartada de Fundição – possíveis aplicações

Uma grande variedade de opções de reutilização de ADF tem sido sugerida. ADF provenientes de fundições não ferrosas (alumínio, bronze, cobre, latão) geralmente não são reutilizadas (SIDDIQUE, 2007). O Quadro 2 mostra um ranking de aplicações com a reutilização de ADF nos Estados Unidos em função do volume empregado.

Ranking de aplicação	
1	Terraplenagem de estradas
2	Base e sub-base de pavimentação
3	Concreto asfáltico
4	Material de baixa resistência controlada para preenchimento fluido
5	Solo/horticultura
6	Produtos de cimento e concreto
7	Outras aplicações

Quadro 2 – Ranking de Aplicações de reúso de ADF  
Fonte: FIRST, 2004

#### 1) terraplenagem de estradas

Muitos empreiteiros verificaram que trabalhar com ADF, principalmente areia verde, é semelhante a trabalhar com materiais de construção convencionais. Para garantir desempenho a longo prazo e a construção bem sucedida com o emprego de ADF é importante (FIRST, 2004):

a) avaliar a disponibilidade.

Entrar em contato com a fundição fornecedora e determinar se a demanda de ADF pode ser obtida no prazo exigido.

b) investigar as condições do terreno.

Assim como em qualquer projeto, utilizar técnicas geotécnicas padronizadas para avaliar as condições de solo e águas subterrâneas.

c) avaliar as propriedades físicas e químicas da ADF.

As propriedades físicas que irão determinar o comportamento da areia são: a granulometria; resistência ao cisalhamento; compressibilidade; e permeabilidade. Testes usuais de laboratório projetados para analisar as propriedades do solo são utilizados da mesma forma para análise de ADF. Os distribuidores de areia devem fornecer informações sobre as propriedades físicas e composição química da mesma, detalhando a possibilidade de algum lixiviado que deva ser considerado.

Com relação aos impactos ambientais, deve-se avaliar se a ADF atende aos padrões estabelecidos para lixiviados estabelecidos pelas agências regulamentadoras. A quantidade de lixiviados produzida pode ser controlada assegurando uma compactação adequada e garantindo escoamento superficial. Finalizada a construção, a aplicação de uma cobertura de solo devidamente preparado deverá reduzir a infiltração (FIRST, 2004).

## 2) base e sub-base de pavimentação

A base é a camada de pavimentação destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os adequadamente à camada subjacente, executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito. A sub-base é a camada de pavimentação, complementar à base e com as mesmas funções desta, executada sobre o subleito ou reforço do subleito. Ambas são constituídas por solos, britas de rochas, de escória de alto forno, ou ainda, pela mistura desses materiais (DNIT, 2009).

A reutilização de ADF com pavimentação é considerada uma atividade atrativa em função da grande demanda de areia exigida, o que reduz consideravelmente os custos tradicionais na construção. Estudos em laboratório indicaram que a ADF pode ser utilizada com segurança como um componente das sub-bases de pavimentação fornecendo boa propriedade geotécnica, e testes de lixiviação indicaram que a água que passa por tais sub-bases não é contaminada com componentes indesejáveis (GUNEY et al., 2006).

Entretanto, com relação às necessidades de mercado, a comercialização da areia descartada depende da disponibilidade de outros materiais que se encontram perto ou no próprio local de obras. A vantagem inicial do baixo custo da ADF pode ser rapidamente compensada com as despesas para o transporte (FIRST, Op. cit.).

### 3) concreto asfáltico

A areia de fundição tem sido usada com sucesso para substituir uma parcela do agregado fino que é usado em misturas asfálticas convencionais. A ADF pode ser usada para substituir entre 8 e 25% do agregado fino. As misturas do asfalto que contêm a areia de fundição podem ser projetadas usando métodos de projeto padrão. Assim, a ADF pode ter um alto custo-benefício para a indústria de fundição bem como para a indústria de construção rodoviária (FIRST, 2004).

No Brasil, Bina et al. (2002) realizaram uma pesquisa sobre a utilização da ADF na pavimentação asfáltica armada, e concluíram que este tipo de aplicação é ambientalmente viável.

Coutinho Neto (2004), demonstrou que o reaproveitamento de ADF como parte de agregado fino em mistura asfáltica é viável, tanto do ponto de vista ambiental quanto no que diz respeito às propriedades mecânicas de interesse à engenharia de pavimentação. Essa asserção pode ser feita, visto que as misturas asfálticas nas condições de envelhecimento testadas com a incorporação de 5, 10, 15% em peso desse resíduo, apresentaram propriedades mecânicas satisfatórias e as análises químicas realizadas caracterizaram este resíduo como não-inerte.

Da mesma forma, Carnin (2008) realizou um estudo de reutilização de areia verde em misturas asfálticas e concluiu que as espécies químicas dos parâmetros críticos que haviam extrapolado valores máximos permitidos na análise da amostra bruta foram encapsuladas no concreto asfáltico, de modo a respeitar todos os limites estabelecidos, mesmo quando o corpo de prova foi triturado ou envelhecido.

### 4) material de baixa resistência controlada para preenchimento

Consiste num material composto por areia, água, cimento e, às vezes, cinzas volantes. As misturas são estabelecidas numa consistência fluida para facilitar seu manuseio proporcionando um produto equivalente a solo compactado de alta qualidade (FIRST, 2004).

A ADF pode ser utilizada como principal componente em material de baixa resistência controlada para preenchimento. A característica fluida deriva da granulometria e formatos das partículas da areia. Quando misturadas com quantidade suficiente de água, a cinza volante e a ADF são lubrificadas fornecendo a condição fluida (FIRST, Op. cit.).

Deng e Tikalsky realizaram em 2007 um estudo com amostras de 17 (dezesete) fundições dos Estados Unidos. As propriedades

geotécnicas de lixiviação das fases fresca e endurecida do material de preenchimento se encontravam em conformidade com o desejável e abaixo dos critérios de regulamentação, o que indica que não há razões tanto nas questões de engenharia quanto ambiental para impedir o reúso a ADF neste tipo de aplicação.

Entretanto, Siddique e Noumowe, (2008) aponta que quanto mais ADF a mistura contiver, mais a propriedade de resistência a compressão é reduzida, sendo que a areia ligada quimicamente reduz mais que a verde.

#### 5) solo/ horticultura

Vários são os requisitos para um material ser utilizado como componente de solos manufaturados. Eles devem apresentar diversos atributos como, nutrientes para plantas, textura, ou matéria orgânica que contribua para a fertilidade/qualidade ou forneça um benefício funcional (correção da acidez do solo, retenção de água). As ADF muitas vezes demonstram essas qualidades, tornando-as potencialmente atraentes no emprego de solos manufaturados, fornecendo também melhoramento de propriedades físicas e químicas em misturas com solos naturais. Elas contêm nutrientes para plantas, carbono orgânico, argila e textura arenosa que garante boa drenagem (DUNGAN et al., 2009).

A cor escura da ADF (areia verde) pode ser atraente para este tipo de aplicação. A presença da bentonita, componente da argila presente na areia verde, aumenta a capacidade de retenção de nutrientes do solo e indiretamente, a fertilidade do mesmo. O pH da areia, especialmente quando alcalina também pode ser usado para ajustes do pH de solos ácidos (OWENS, 2008).

ADF também pode atuar como um dos componentes em pátio de compostagem de resíduos orgânicos. Neste tipo de aplicação, a ADF reduz a formação de aglomerados e impede a compactação da mistura, o que permite a circulação do ar estimulando a decomposição (FIRST, 2004). A substituição da areia natural por ADF para aplicações na Agronomia tem sido sugerida como uma excelente oportunidade de mercado para pequenas e grandes fundições (ABICHOU et al., 1998 apud OWENS, Op. cit.).

#### 6) produtos de cimento e concreto

ADF pode ser utilizada na produção de cimento porque é composta em grande parte por sílica, alumina e óxido de ferro que são ingredientes-chave do cimento. Cimento é um produto em pó que quando misturado com água endurece para formar o concreto. Dessa

forma, conclui-se que o cimento é na verdade, um ingrediente do concreto (OWENS, 2008).

O concreto de cimento Portland é uma mistura de aproximadamente 25% de agregados finos, 45% de agregados graúdos, 20% de cimento e 10% de água. A ADF pode ser reutilizada na produção deste concreto como material substituto de agregados finos (FIRST, 2004).

A ADF deve preencher alguns requisitos para este tipo aplicação: a quantidade de sílica deve ser igual ou maior que 80% na areia; deve ter tamanho uniforme de partículas e grande volume disponível. Para a maioria das fundições que procuram fornecer ADF às empresas de cimento, as únicas providências necessárias consistem na simples peneiração ou segregação para garantir uniformidade e atender as necessidades do processo de fabricação do cimento (FIRST, Op. cit.).

Os produtores de cimento Portland devem avaliar a ADF e confirmar sua compatibilidade com outras matérias-primas. Devem requisitar também análise química de óxidos, resultados de testes de lixiviação, e relatório do volume anual de ADF produzido pela indústria. A análise química de óxidos mostra a quantidade de sílica presente na areia, enquanto o teste de lixiviação indica se a areia é ou não perigosa para o meio ambiente (FIRST, Op. cit.).

Fábricas de cimento requerem quantidades significativas de sílica, cerca de 10.000 – 40.000 toneladas anuais por indústria. É improvável que uma única fundição possa fornecer tanta areia. A areia de diversas indústrias deve ser recolhida em um local de armazenamento comunitário para atender a demanda (FIRST, Op. cit.).

O concreto utilizando ADF pode ser moldado in loco ou pré-moldado na fabricação de produtos como tubulações e blocos de concreto. O tipo de uso, a forma e tamanho do produto determinarão o tipo e a granulometria do agregado exigidos na mistura. Todos os ensaios de determinação de propriedades geotécnicas devem ser realizados (FIRST, Op. cit.).

Quando a resistência à compressão requisitada está entre 50 psi e 2500 psi, a substituição de até 50% por ADF tem tido resultados positivos (FIRST, Op. cit.). Propriedades de resistência das misturas aumentam com a quantidade de ADF utilizada (SIDDIQUE e NOUMOWE, 2008).

Por outro lado, a ADF por ser geralmente preta, pode conferir uma tonalidade indesejada no concreto. Uma substituição de 15% dos agregados finos por ADF produz uma alteração mínima na coloração (FIRST, Op. cit.).

## 7) outras aplicações

Outras aplicações de ADF em engenharia podem ser consideradas:

- argamassa

Argamassas são compostas por areia, cimento e outros aditivos. São utilizadas para: assentar tijolos e blocos de concreto, azulejos, ladrilhos, cerâmicas e tacos de madeira; impermeabilizar superfícies; regularizar paredes, pisos e tetos; e dar acabamento às superfícies.

Areias que são deficientes em finos fornecem uma mistura grosseira e aquelas que possuem muitos finos produzem uma argamassa fraca. A ADF é geralmente mais fina que as areias requisitadas, mas pode ser misturada com outra mais grosseira para atender as especificações. Nas argamassas, o agregado fino deve também ser limpo e livre de resíduos e ter um teor de umidade consistente. Assim como no concreto, a cor da areia de fundição pode conferir uma tonalidade escura para a argamassa, exigindo aceitação no projeto antes do uso (FIRST, 2004).

- vitrificação de materiais perigosos

A ADF é um candidato ideal para encapsular, vitrificar e neutralizar materiais perigosos por causa da grande quantidade de sílica. Testes preliminares verificaram a viabilidade desta opção (FIRST, Op. cit.).

- fabricação de fibra de vidro

Fibras de vidro são produzidas com o derretimento de areias silicosas e estiramento através de uma peneira de platina com furos microscópicos. A ADF atende as especificações de quantidade de sílica e granulometria exigidas neste tipo de aplicação (FIRST, Op. cit.).

Assim como os Estados Unidos, outros países também reutilizam as ADF em diversas aplicações, conforme observado no Quadro 3.

País	Aplicação
Alemanha	Mistura asfáltica e construção civil
Austrália	Produção de cimento, concreto e tijolos, mistura asfáltica e corretivo de solo
Bélgica	Subproduto para construção civil como estradas, fabricação de cimento e tijolos
Dinamarca	Material de enchimento, material para base e sub-base de pavimentação
Finlândia	Aditivo para compostagem
França	Mistura asfáltica
Suécia	Cobertura final de aterros e camadas internas de drenagem

Quadro 3 – Aplicação das ADF em alguns países

Fonte: GIBBS, 2007 apud QUISSINI, 2009

### 2.3.5 Fatores que impedem a reutilização da Areia Descartada de Fundição no Brasil

Comparado com outros países, o Brasil ainda se encontra atrasado em relação às alternativas de reúso da ADF. Uma variedade de fatores contribui para isto. Fatores estes que afetam cada uma das partes interessadas que poderiam desenvolver um papel benéfico para a reutilização deste resíduo. Dentre as partes interessadas destacam-se (EPA, 2002):

- O Estado, que possui o desafio de desenvolver uma estrutura regulamentadora que simultaneamente garanta proteção ambiental e incentive o reúso apropriado.
- Possíveis consumidores finais, que muitas vezes nem sabem o potencial de reutilização da ADF.
- E as próprias indústrias fundidoras, que podem não ter noção dos potenciais usos para as ADF, ou das simples mudanças operacionais que acarretariam em efeitos significativos nas características das areias, o que ampliaria suas habilidades em achar alternativas de reúso.

Dentre os fatores que impedem a reutilização da ADF, Owens (2008) indica cinco principais barreiras:

#### 1) percepção da ADF como um resíduo

A percepção da ADF como um material residual deve ser alterada para a ideia de recurso material altamente valioso, que atualmente é subestimado pela indústria de maneira geral.

Há o conceito errôneo inicial de que as areias descartadas podem não corresponder às exigências técnicas ou podem conter quantidades inaceitáveis de contaminantes.

#### 2) aprovação legislativa

Mesmo quando é realizado um processo de aprovação, deve haver um supervisionamento das autoridades legislativas que devem monitorar o programa de reutilização. A opção mais fácil para muitos, é simplesmente restringir ou banir o reuso.

#### 3) efetividade de custo e viabilidade econômica

Uma das maiores limitações da reutilização da ADF é a distância entre a fundição e o local de aplicação. Os custos com transporte e logística são os principais a serem considerados no reuso, e não a areia propriamente dita. Programas de reutilização de ADF devem ser realizados próximos às indústrias de fundição para atingirem um efetivo custo-benefício.

#### 4) consistência da ADF

Um dos maiores desafios não se encontra na qualidade da ADF, mas sim na falta de uniformidade do resíduo. Geralmente, pelo fato de serem provenientes de uma grande variedade de processos de fundição e pela grande quantidade de sistemas ligantes empregados, as características físicas e químicas das ADF variam significativamente de fundição para fundição dificultando a obtenção de grandes volumes uniformes para uma aplicação específica.

O desafio para a indústria é fornecer ADF suficiente e de qualidade consistente que venham ao encontro dos requerimentos de potenciais consumidores finais.

#### 5) gestão

Para identificar uma opção de reuso, o primeiro desafio se encontra na caracterização completa da areia para que todos os potenciais contaminantes sejam quantitativamente conhecidos.

Este esforço exigirá um gerenciamento disposto a dedicar recursos para amostragem e monitoramento contínuo de seu processo e estoque de areia a fim fornecer ADF de alta qualidade.

A ABIFA vem realizando um movimento que pretende viabilizar legalmente, tecnicamente e economicamente a reutilização das ADF. Desta maneira vem ocorrendo o desenvolvimento da relação com os órgãos ambientais, ONGs e outros representantes da sociedade civil organizada, onde se apresentam dados técnicos devidamente organizados, de maneira que possam ser aceitas “legalmente” e que embasem tecnicamente as solicitações, para que as ADF tenham um tratamento diferente do atual (ABIFA, 2011b).

Para disponibilizar as ADF como matéria prima não adianta existir a base legal e as consequentes autorizações se não houver viabilidade econômica e técnica que façam com que exista um mercado interessado. É fundamental fornecer dados às empresas para que também sejam encontradas soluções e desenvolvidas melhores práticas (ABIFA, Op. cit.).

Para caracterizar a ADF é necessário identificar todas as propriedades físicas e os efeitos dos contaminantes orgânicos e metais presentes na areia (WINKLER e BOL'SHAKOV, 1999). Dentro deste contexto, torna-se evidente a necessidade da realização de testes com as ADF a fim de caracterizar totalmente este resíduo. Nesse sentido as partes interessadas são beneficiadas (EPA, 2002):

- O Estado, quando possuidor de um banco de dados tem facilitado o processo de determinação de aplicações das ADF. Trata-se de uma fonte para um guia de entendimentos e/ou desenvolvimento de regulamentos.
- Potenciais consumidores podem explorar o uso potencial da areia de fundição como uma alternativa, ao invés de matérias primas virgens.
- Indústrias de fundição que podem tirar vantagem, principalmente no plano econômico com a reutilização da ADF.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 ESTUDO DE CASO

Este trabalho quantificou a presença de elementos traços presentes em uma amostra de areia verde proveniente da Fundação Tupy S.A, objetivando estudar o nível destes contaminantes e identificar os efeitos dos mesmos à saúde humana e ao meio ambiente.

#### 3.2 FUNDIÇÃO TUPY S.A

Fundada em 1938, em Joinville, Santa Catarina, região Sul do Brasil, a Tupy S.A tem capacidade para produzir 500 mil toneladas anuais de peças em ferro fundido, em dois parques fabris: um em Joinville e, outro, em Mauá, no Estado de São Paulo, região Sudeste do Brasil (TUPY, 2011).

Grande parte da produção da Tupy S.A é constituída de componentes desenvolvidos sob encomenda para o setor automotivo, que engloba caminhões, ônibus, utilitários, automóveis, tratores e outras máquinas agrícolas (TUPY, Op. cit.).

A Tupy S.A também produz e comercializa conexões de ferro maleável, granalhas de ferro e aço e perfis contínuos de ferro, produtos que atendem à indústria da construção, a de mármore e granitos e a segmentos diversos da engenharia industrial, entre outros (TUPY, Op. cit.).

A Tupy S.A reutiliza as areias descartadas dos processos de macharia, no parque fabril de Joinville (SC). Esse montante de areia corresponde a cerca de 15% do total consumido (TUPY, Op. cit.).

O grande desafio da Tupy S.A tem sido o de encontrar solução para as areias descartadas dos processos de moldagem - 85% do total consumido.

Nesse sentido, a Tupy S.A age em duas frentes. A empresa vem adequando seu aterro industrial próprio conforme padrões exigidos para receber essas areias e outros resíduos industriais. E também lidera um movimento junto aos órgãos ambientais, com a participação de outras fundições brasileiras e com base em pesquisas que vem realizando, no sentido de modificar normas técnicas que, no Brasil, impedem a

utilização de areias de moldagem para outros fins, capazes de transformar passivos em ativos ambientais (TUPY, 2011).

### 3.3 OBTENÇÃO DA AMOSTRA

A amostra de ADF é proveniente do processo de moldagem em areia verde da Fundação Tupy S.A. Esta foi fornecida pela empresa à Universidade Federal de Santa Catarina para realização do projeto de mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da estudante Bárbara Samartini Queiroz Alves, co-orientadora deste trabalho.

A amostra foi coletada realizando todos os procedimentos especificados na NBR 10007:2004 para coleta e armazenamento.

### 3.4 ELEMENTOS TRAÇOS DETERMINADOS

Foram realizadas medições de nove elementos compreendidos no Quadro 4 em amostras sólidas e lixiviadas.

Cádmio	Cálcio	Chumbo
Cobre	Cromo	Ferro
Magnésio	Níquel	Zinco

Quadro 4 – Elementos analisados

A escolha desses elementos teve como base aos efeitos fitotóxicos (Zn, Cu, Ni), aos efeitos tóxicos para os humanos (Cd, Pb, Cr), pela relevância em termos quantitativos (Fe, Mg, Ca) e pela disponibilidade de recursos disponíveis para esta pesquisa.

#### 3.4.1 Técnica de Medição

A técnica utilizada foi a de Espectrofotometria de Absorção Atômica de chama FAAS (*Flame Atomic Absorption Spectrometry*), que consta no método 7000B de avaliação de resíduos sólidos da EPA –

SW-846 (2007). Trata-se de um método usado para determinar quantitativamente a presença de metais através de aspiração direta.

Este método é simples, rápido, e aplicável a um amplo número de amostras, incluindo as de lençol freático, amostras aquosas, extratos, resíduos industriais, solos, lodos, sedimentos e similares (EPA, 2007a).

Neste método a amostra é aspirada e atomizada na chama. Um feixe de luz de uma lâmpada catódica oca é direcionado através da chama dentro de um monocromador e em um detector que mede a quantidade de luz absorvida. A absorção depende da presença de átomos no estado fundamental livres não excitados. Em razão do comprimento de onda do feixe de luz ser característico para o único metal que está sendo determinado, a energia de luz absorvida pela chama é medida pela concentração do metal na amostra. Esse princípio é a base da espectrofotometria de absorção atômica (EPA, Op. cit.).

O aparelho empregado para leitura encontra-se no Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA), situado no Campus da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no prédio do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS). O modelo do aparelho de espectrofotometria de absorção atômica é o SpectraAA 50B, fabricado pela Varian, Inc.

### **3.4.2 Método de digestão da amostra sólida**

Para leitura no FAAS é necessária a digestão prévia das amostras (EPA, Op. cit.). Para isso, foi utilizado o método de digestão ácida do EPA (1996) 3050B – Digestão Ácida de sedimentos, lodos e solos – com modificações nos reagentes utilizados com a finalidade de obter a digestão total da amostra.

No método 3050B as amostras são vigorosamente digeridas em ácido nítrico e peróxido de hidrogênio seguido pela diluição com ácido nítrico ou clorídrico. Com a amostra da Tupy S.A foi utilizado também o ácido fluorídrico a fim de proporcionar uma digestão total.

Cinco gramas de cada amostra (em triplicata) foram colocadas em contato com 5,0 mL de ácido fluorídrico (HF 48%). Depois se levou a mistura ao aquecimento até secar o ácido. Adicionou-se 12 mL de água régia (3HCl e HNO<sub>3</sub>) e 2,0 mL de HF. Após resfriar, filtrou-se o extrato com água Milli-Q em papel filtro de 28 µm de porosidade e, foi efetuada a leitura no FAAS.

Os procedimentos de digestão também foram executados no LIMA – ENS/UFSC.

### **3.4.3 Lixiviação da Amostra**

A lixiviação foi realizada também no LIMA de acordo com a NBR 10005:2004. Seguindo os procedimentos recomendados, fez-se um pré-teste determinando o pH da amostra diluída em água desionizada. Dependendo do pH utiliza-se uma das duas soluções de extração especificadas na norma. Como o pH apresentado foi inferior a 5 (cinco), utilizou-se a solução de extração n<sup>o</sup>1, que contém ácido acético glacial e hidróxido de sódio em 1L completando com água desionizada.

Pesou-se 50g de amostra preparada (em triplicata) e transferiu-se para o frasco de lixiviação adicionando a solução de extração determinada previamente numa quantidade igual a 20 vezes a massa utilizada, ou seja, 1L. O frasco contendo a mistura foi colocado sob agitação durante 18h à temperatura de 25° C com uma rotação de 30 rpm no aparelho designado Agitador Rotatório de Frasco.

Após esse período, filtrou-se a amostra utilizando um aparelho de filtração pressurizado, com filtro de fibra de vidro com porosidade de 0,6 µm. Os filtros foram lavados com solução de HNO<sub>3</sub>. Mediu-se então, o pH do filtrado obtido, que é denominado extrato lixiviado.

### **3.4.4 Método para determinação dos metais no lixiviado**

Para leitura dos elementos traços do lixiviado no FAAS deve-se realizar um procedimento de digestão das amostras utilizando o método 3010A da EPA (1992).

Seguindo este método, foram transferidos 100 mL para um béquer e adicionou-se 3,0 mL de HNO<sub>3</sub> concentrado, e colocando-o numa chapa aquecedora até restar aproximadamente 5,0 mL da amostra. Após resfriar, foram adicionados 3,0 mL de HNO<sub>3</sub> concentrado. O béquer novamente foi colocado na chapa aquecedora até a digestão completa indicada pelo clareamento da amostra.

Após resfriamento, foi adicionado 10 mL de HCl e ajustou-se o volume final para 100 mL com água ultra pura para realizar os procedimentos de leitura no FAAS.

### **3.4.5. Comparação dos resultados da amostra sólida**

Para os elementos presentes na amostra comparou-se o resultado das leituras no FAAS com a Resolução Nº 420, de 28 de dezembro de 2009 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA – que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.

O Anexo II desta Resolução traz uma lista de valores orientadores para solos. Valores orientadores são concentrações de substâncias químicas que fornecem orientação sobre a qualidade e alterações do solo (CONAMA, 2009).

O valor de prevenção é a concentração de valor limite de determinada substância, tal que o solo seja capaz de sustentar suas funções principais como (CONAMA, Op. cit.):

- servir de meio básico para sustentação da vida e de habitat para pessoas, animais, plantas e outros organismos;
- manter o ciclo da água e dos nutrientes;
- servir como meio para a produção de alimentos e outros bens primários de consumo;
- agir como filtro natural, tampão e meio de adsorção, degradação e transformação de substâncias químicas e organismos;
- proteger as águas superficiais e subterrâneas;
- servir como fonte de informação quanto ao patrimônio natural, histórico e cultural;
- constituir fonte de recursos minerais; e
- servir como meio básico para a ocupação territorial, práticas recreacionais e propiciar outros usos públicos e econômicos.

Já o valor de investigação é a concentração de determinada substância no solo acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado: agrícola, residencial ou industrial (CONAMA, Op. cit.).

Os resultados obtidos com a leitura no FAAS também foram comparados com alguns estudos encontrados na literatura que

caracterizaram amostras de areia verde de fundições ferrosas a fim de determinar a possibilidade de reutilização da mesma.

Foram, portanto, selecionados quatro estudos:

- Estudo A, referente ao trabalho de Lindsay e Logan, (2006) que investigou a reutilização da areia na agricultura e examinou os riscos para a cadeia alimentar humana de elementos traços da areia de fundição. De acordo com os resultados obtidos neste estudo há pouco risco de exposição humana tanto a partir da alimentação quanto da ingestão direta do solo.

- Estudo B, conduzido por Stehower et al. (2010), utilizando duas amostras de areia verde de fundições ferrosas e uma amostra de areia verde de fundição de alumínio, mas para comparação utilizou-se apenas os dados das areias verdes ferrosas, por ser o mesmo tipo da estudada neste trabalho. Este estudo obteve misturas de areias verdes com solos de alta qualidade e baixo risco de contaminação dos elementos traços

- Estudo C, realizado por Dungan e Dees (2006), que determinou os metais de duas amostras de areias verdes de fundições ferrosas através da metodologia do EPA 3050B teve como objetivo avaliar a toxicidade da areia com minhocas. É sugerido, com base na mortalidade das minhocas e dados de acumulação do metal, que as areias verdes não representam um risco ecotoxicológico de transferência de metais.

- Estudo D, realizado por Dungan et al. (2009), com a análise total para 19 metais com o método 3050B (SW-846) de 36 areias verdes e 7 ligadas quimicamente. As ADF foram coletadas de fundições de 12 Estados em Junho de 2005, Setembro de 2005 e Julho de 2006. Este estudo foi escolhido pelo grande número de amostras analisadas.

### **3.4.6 Comparação dos resultados da amostra lixiviada**

A NBR 10004:2004 traz em seu Anexo F limites máximos no lixiviado de alguns metais. A Resolução nº 420 do CONAMA, no Anexo II, lista valores orientadores de investigação para águas subterrâneas. Há também os valores máximos permitidos de padrões de potabilidade de substâncias químicas que representam risco à saúde

definidos na Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde. A Portaria nº 1469/2001 do Ministério da Saúde estabelece o Controle e Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano e seu Padrão de Potabilidade. Estas foram as normas utilizadas para comparação com os resultados dos metais analisados neste trabalho.

Assim como na amostra sólida, foram selecionados alguns estudos para comparação com os resultados da amostra lixiviada da Tupy S.A:

- Estudo A, realizado por Lee e Benson (2006) com doze amostras de areias verdes de três Estados americanos (Illinois, Ohio e Wisconsin).
- Estudo B, referente ao realizado por Ji et al. (2001), que determinou a concentração de lixiviados do As, Ba, Cd, Cr, Pb, Hg, Se, Ag, Cu e Zn de três amostras de areias verdes.
- Estudo C, elaborado por Dungan et al. (2009), com a análise de 11 metais com o método TCLP, onde 43 amostras foram coletadas e analisadas em junho de 2005, 38 em setembro de 2005 e 37 em julho de 2006 totalizando na determinação da concentração de elementos traços em 118 amostras.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CONCENTRAÇÃO TOTAL DE ELEMENTOS TRAÇOS NA AMOSTRA SÓLIDA

Com a Tabela 2 é possível verificar os resultados de cada metal comparados com os valores orientadores presentes no Anexo II da Resolução Nº 420, CONAMA.

Tabela 2 – Comparação entre resultados da amostra sólida da Tupy e valores orientadores da Resolução Nº420, CONAMA

Substâncias	mg.kg <sup>-1</sup> de peso seco				
	Amostra ADF Tupy	Prevenção	Investigação		
			Agrícola APMax	Residencial	Industrial
Cádmio	ND	1,3	3	8	20
Cálcio	956,20	NE	NE	NE	NE
Chumbo	ND	72	180	300	900
Cobre	3,85	60	200	400	600
Cromo	5,07	75	150	300	400
Ferro	5737,93	-	-	-	-
Magnésio	15961,93	NE	NE	NE	NE
Níquel	ND	30	70	100	130
Zinco	100,11	300	450	1000	2000

NE – não especificado

ND – não detectado pelo FAAS

O que se pode perceber é que, pelo menos nos elementos estudados e especificados no Anexo II desta Resolução, todos se encontram abaixo dos valores de prevenção e investigação. Essa afirmação, porém, é muito vaga, principalmente por se tratar de uma única análise de amostra singular. Sem contar também, que limites de elementos detectados na leitura não são especificados pela Resolução, como no caso do Ca, Fe e Mg.

A Tabela 3 traz a comparação com os resultados obtidos de estudos presentes na literatura escolhidos para comparação.

Tabela 3 – Comparação entre concentração de elementos traços da amostra sólida da Tupy e literatura

Metais	Alguns estudos realizados								
	mg.kg <sup>-1</sup> de peso seco								
Amostra Tupy	A	B		C		D			
Cd	ND	ND	<0.4	<0.4	<2.6	<2.6	ND	ND	ND
Ca	956,20	-	200	708	998.9	2095.2	-	-	-
Pb	ND	3,76	2.42	1.07	<16.2	<16.2	5.1	5.8	13.6
Cr	5,07	ND	51.18	5.25	1.4	1.8	11.6	12.4	8,8
Cu	3,85	-	137	3.09	<10.2	<10.2	97.1	772	148
Fe	5737,93	-	47480	1001	1206.5	1973.4	5976	6262	4867
Mg	15961,93	-	252	909	<1693	<1693	2804	1313	1285
Ni	ND	1,26	9.15	26.3	<2.6	<2.6	85.7	10.9	12.2
Zn	100,11	10,3	5.32	7.54	7.3	6.2	60.1	723	102

A – Lindsay e Logan (2006)

B – Stehower et al. (2010)

C – Dungan e Dees (2006)

D – Dungan et al., (2009)

ND – não detectado

Comparando os resultados com a amostra da Tupy S.A, percebe-se que Cr e Zn tiveram valores superiores ao estudo A, no entanto, ainda estão bem abaixo dos valores regulamentados pela Resolução N°420 do CONAMA.

A digestão total da areia verde da Tupy S.A obteve resultados bastante semelhantes com uma das amostras do estudo B. É o que ocorre com os elementos Cd, Cu e Cr, e resultados inferiores com o Pb e Ni. Entretanto, Mg e Zn se encontravam em concentrações superiores, apesar do Zn se apresentar em conformidade com a legislação. O Zn é um elemento traço considerado preocupante, assim como Cu, Ni e Pb, por poder causar impactos adversos na saúde humana e meio ambiente (DUNGAN e DEES, 2006). O Zn é um contaminante comum do solo por causa do seu uso comercial difundido em produtos para plantio (CHANEY, 1993 apud DUNGAN et al., 2009). No entanto, solos alcalinos podem conter mais de 1000 mg.kg<sup>-1</sup> de Zn sem apresentar efeitos adversos, e até mais de 10000 mg.kg<sup>-1</sup> de Zn sem prejudicar plantas ou animais selvagens (DUNGAN et al., Op. cit.).

A areia da Tupy S.A apresentou concentrações superiores dos elementos Cr, Fe, Mg e Zn quando comparados com o estudo C. Com relação ao Cr e Zn percebe-se a mesma situação da comparação realizada com o estudo A.

O Fe ocorre naturalmente em solos, e muitas vezes excedem as concentrações totais, tornando-os macro ao invés de elementos traços.

Fe é um nutriente essencial de plantas e com frequência são deficientes em solos com pH aproximadamente neutro. Em altas concentrações disponíveis, Fe é um elemento fitotóxico, ou seja, eles podem reduzir o crescimento das plantas. A fitotoxicidade deste elemento é extremamente rara, pois para isto, o pH teria que ser bem inferior que 5 para o Fe se encontrar em quantidade disponível suficiente para ser absorvido pelas plantas em excesso (LINDSAY e LOGAN, 2006).

Estão relatados na Tabela 3 os valores intermediários obtidos (quando detectados) na leitura dos elementos no estudo D. Comparando com os resultados da amostra da Tupy S.A percebe-se que para a grande maioria dos metais os resultados se mostraram semelhantes ou abaixo dos de D, inclusive no caso do Fe e Zn, que, adversamente em relação aos estudos A B e C, foram determinados em concentração superior à literatura. A predominância de amostras de areias verdes de fundições ferrosas neste estudo indica que há muito mais características deste tipo de areia nos resultados, mas pode haver alguma alteração dos resultados por conta da também análise de areias ligadas quimicamente.

O Mg presente na areia da fundição catarinense apresentou concentração bem mais elevada, apesar de menor discrepância de dados dos outros casos de comparação verificados.

Ponderando a maior abrangência e representatividade dos dados obtidos com o estudo D, pode-se considerar que a areia verde da Tupy S.A, com exceção da concentração do Mg, não difere das estudadas pela literatura, sendo desta forma, viável a sua reutilização. Elementos traços como Ni e Pb, que são de grande preocupação ambiental nem chegaram a ser detectados pelo FAAS.

## 4.2 ELEMENTOS TRAÇOS NA AMOSTRA LIXIVIADA

A Tabela 4 estabelece a comparação entre os resultados obtidos na leitura com o FAAS da amostra da Tupy S.A. e a legislação pertinente.

Tabela 4 – Comparação entre resultados de amostra lixiviada da Tupy e legislação pertinente

Elementos	Amostra Tupy	NBR 10004: 2004	Resolução CONAMA nº420/2009	Portaria nº 518/2004	Portaria nº 1469/2001
Unidade	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Cádmio	ND	0,5	0,005	0,005	0,005
Cálcio	9,45	NE	NE	NE	NE
Chumbo	<LD (0,15)	1,0	0,01	0,01	0,01
Cobre	<LD(0,038)	NE	2,0	2,0	2,0
Cromo	ND	5,0	0,05	0,05	0,05
Ferro	1,34	NE	2,45	NE	0,3
Magnésio	1,88	NE	NE	NE	NE
Níquel	0,03	NE	0,02	NE	NE
Zinco	0,52	NE	1,05	NE	5,0

NE – não especificado

ND – não detectado pelo FAAS

<LD – abaixo do limite de detecção

Percebe-se que com relação à NBR 10004:2004 a areia verde da Tupy S.A, conforme esperado, se caracteriza como um resíduo não perigoso (considerando os elementos traços analisados neste estudo), pois as concentrações dos elementos Cd, Pb e Cr se encontram abaixo dos normatizados, sendo que Cd e Cr nem chegaram a ser detectados pelo método de leitura.

Quando a concentração se encontra abaixo do limite de detecção indica que há a presença deste elemento na amostra, porém em quantidade inferior à da curva de calibração do aparelho, é o que ocorre no caso do Pb e Cu da amostra da Tupy S.A. O limite de detecção do chumbo é maior do que o máximo estabelecido pela legislação, assim, não foi possível determinar se a amostra da Tupy respeita ou não os valores indicado.

Com exceção dos elementos Fe e Zn, verifica-se que todos os limites estabelecidos pelas Portarias e pela Resolução do CONAMA são idênticos. Cd, Cu, Cr e Zn estão em conformidade com todos os valores máximos permitidos por estas normas.

O Fe excedeu o limite de consumo da Portaria 1469/2001, mas ainda se encontrou em concentração inferior ao valor orientador de investigação para águas subterrâneas do CONAMA. Concentrações de Fe geralmente ultrapassam os padrões de potabilidade da água, porém estes são estabelecidos para este elemento, por questões estéticas ao

invés de questões de saúde. Portanto, a concentração elevada de Fe não se trata de um problema de saúde (LEE e BENSON, 2006).

A Tabela 5 traz os resultados da determinação quantitativa dos elementos traços da Amostra da Tupy S.A. comparados com alguns estudos realizados.

Tabela 5 – Comparação entre concentração de elementos traços da amostra lixiviada da Tupy e literatura

Metais	Alguns estudos realizados							
	mg/L (ppm)							
	Amostra Tupy	A	B			C		
Cd	ND	0.00013	0.051	0.18	0.06	0.007	0,005	0.007
Ca	9,45	-	-	-	-	-	-	-
Pb	<LD (0,15)	0.00238	0.056	0.04	0.1	0.027	0.025	0.055
Cr	ND	0.0016	0.154	0.2	0.05	0.23	0.23	0.23
Cu	<LD(0,038)	0.01335	0.057	0.06	256	0.193	1.23	0.194
Fe	1,34	0.4239	-	-	-	-	-	-
Mg	1,88	-	-	-	-	-	-	-
Ni	0,03	0.00246	-	-	-	0.163	0.092	0.128
Zn	0,52	0.00829	0.084	0.1	0.21	1.16	1.47	1.49

A – Lee e Benson (2006)

B – Ji et al. (2001)

C – Dungan et al. (2009)

ND – não detectado pelo FAAS ; <LD – abaixo do limite de detecção

Para simplificar, fez-se uma média dos resultados do estudo A observada na Tabela 5. Por sua vez, a Tabela 6 mostra detalhadamente as concentrações encontradas nas doze amostras de areia verde analisadas para cada elemento em comum com os deste trabalho e por Lee e Benson (2006) – estudo A.

Tabela 6 – Resultados de lixiviados – Lee e Benson (2006)

	mg/L (ppm)						
	Cd	Pb	Cr	Cu	Fe	Ni	Zn
AV1	0.0001	0.0003	0.0011	0.0124	0.0916	0.0018	0.0023
AV2	<LD	0.0009	0.0016	0.0135	0.6586	0.0020	0.0057
AV3	0.0	0.0002	0.0022	0.0084	0.1638	0.0009	0.0023
AV4	0.0	0.0017	0.0025	0.0171	1.4834	0.0031	0.0088
AV5	0.0001	0.0005	0.0019	0.0154	0.3762	0.0030	0.0059
AV6	0.0003	0.0051	0.0010	0.0179	0.2340	0.0022	0.0024
AV7	<LD	0.0014	0.0005	0.0032	0.5150	0.0019	0.0017
AV8	0.0006	0.0122	0.0017	0.0150	0.4868	0.0024	0.0029
AV9	0.0004	0.0053	0.0017	0.0112	0.4155	0.0070	0.0570
AV10	<LD	0.0003	0.0019	0.0206	0.2560	0.0020	0.0044
AV11	0.0001	0.0004	0.0023	0.0122	0.3425	0.0016	0.0050
AV12	<LD	0.0002	0.0008	0.0133	0.1282	0.0016	0.0011
Média	0.00013	0.00238	0.0016	0.01335	0.4239	0.00246	0.00829

AV- areia verde

Observa-se que a amostra da Tupy S.A apresentou regra geral, valores maiores que os encontrados no estudo A. Essa diferença pode ter se dado em função do método de lixiviação aplicado no estudo A. O ensaio de lixiviação realizado por Lee e Benson (2006) foi o D 3987 da *American Society for Testing and Materials* – ASTM, órgão de normalização dos EUA. Uma comparação dos resultados com o ASTM e o TCLP revela que menor quantidade de metais se encontra em valores superiores aos limites máximos de detecção (DUNGAN e DEES, 2008).

Estes resultados demonstram que o pH afeta a lixiviação de metais de areias descartadas de fundição, uma vez que o ASTM utiliza uma solução de extração não tamponada (DUNGAN e DEES, Op. cit.).

As soluções tampão são geralmente formadas por um ácido fraco e um sal desse ácido, ou, então, por uma base fraca e um sal dessa base. Elas são preparadas dissolvendo-se os solutos em água. É o caso das soluções de extração utilizadas no TCLP. O pH determinado no lixiviado da amostra da Tupy S.A foi 4,53 (média da triplicata). Estudo conduzido por Dungan e Dees (2008) utilizando o ASTM indicou que o pH das amostras variou de 4,7 a 9,9.

Com relação ao estudo B, apenas o Zn da amostra da Tupy S.A apresentou concentração superior. Encontrando-se, porém, em conformidade com a legislação.

Os resultados de valores intermediários do estudo C de cada uma das três baterias de análise são observados na Tabela 5. Verifica-se que todos os elementos traços estudados da areia da Tupy S.A apresentaram resultados inferiores, com exceção do Pb, cuja concentração é inferior

ao limite de detecção, mas esta ainda pode ser maior que as encontradas pelo estudo C.

A Tabela 7 traz os valores mínimos máximos e intermediários de todas as 118 amostras do estudo C comparados com os níveis regulamentadores do TCLP.

Tabela 7 – Comparação Estudo C com TCLP

Elemento	mg.L <sup>-1</sup>			TCLP
	Min	Max	int.	
Cd	<LD	0.06	0.01	1.0
Cr	<LD			5.0
Cu	<LD	43.87	0.53	
Ni	<LD	1.7	0.13	
Pb	<LD	1.13	0.03	5.0
Zn	<LD	42.5	1.36	

Fonte: DUNGAN et al. (2009)

Observa-se que a NBR 10004:2004 é mais restritiva que o TCLP para os elementos Cd e Pb, exigindo concentração máxima de 0,5 e 1,0 mg.L<sup>-1</sup> respectivamente, o que pode implicar numa barreira para reutilização no Brasil.

Dungan et al. (2009) relatam que para determinar o potencial de lixiviação se utiliza modelos de software ou através de modelos empíricos utilizando dados de testes. Empiricamente, eles avaliaram o risco de contaminação de águas subterrâneas. Com os resultados obtidos, a premissa de que os resultados das concentrações totais de elementos traços não devem ser usados para presumir aqueles que são suscetíveis à lixiviação foi apoiada. Portanto, entende-se não se deve relacionar os resultados da concentração total com os da lixiviação.

Constatou-se que nenhum dos estudos analisou os elementos traços Ca e Mg, bem como a legislação utilizada para comparar os dados obtidos também não especificou valores máximos permitidos. Entretanto, o teor de cálcio nas águas subterrâneas varia, de uma forma geral, de 10 a 100 mg.L<sup>-1</sup> (GUIA MEIO AMBIENTE, 2011) Identificou-se valor de Ca inferior a 10 mg.L<sup>-1</sup> na amostra de areia verde, indicando que não há preocupação ambiental relacionada.

O magnésio é um elemento cujo comportamento geoquímico é muito parecido com o do cálcio e, em linhas gerais, acompanha este elemento. Diferentemente do Ca, contudo, forma sais mais solúveis. Nas águas subterrâneas ocorre com teores entre 1.0 e 40 mg.L<sup>-1</sup>. O Mg, depois do Ca, é o principal responsável pela dureza das águas (GUIA

MEIO AMBIENTE, Op. cit.). Com concentração de  $1.88 \text{ mg.L}^{-1}$ , assim como em relação ao cálcio, a areia da Tupy S.A não demonstra preocupação ambiental aparente relacionada com o Mg.

## 5 CONCLUSÕES OBTIDAS

Com este estudo foi possível constatar que há diversas formas de reutilização das areias descartadas de fundição. Para determinar a viabilidade é necessário caracterizar o resíduo identificando os elementos metálicos e contaminantes orgânicos presentes na areia. Este trabalho teve como foco a determinação de elementos traços presentes na areia verde da fundição Tupy S.A.

Com os resultados encontrados, podemos concluir que com relação à digestão total da amostra sólida, o elemento traço Zn de uma forma geral, apresentou concentração superior que as encontradas pela literatura. No entanto, o Zn ainda se encontrou bem abaixo dos valores de prevenção e investigação da Resolução N°420 do CONAMA.

O Zn, assim como Cu, Ni e Pb são os elementos que mais podem causar efeitos adversos na saúde e no meio ambiente. Ni e Pb nem chegaram a ser detectados pelo FAAS e Cu, apesar de detectado, apresentou concentração inferior tanto à legislação quanto à literatura. Portanto, a areia verde da fundição Tupy S.A não se caracteriza como um resíduo de preocupação ambiental, tornando viável a sua reutilização do ponto de vista de não contaminação do solo e causador efeitos negativos à saúde do ser humano pelos elementos estudados neste trabalho.

Com relação à análise do lixiviado, a amostra se caracteriza por um resíduo não perigoso, e de uma forma geral, a concentração dos elementos traços se encontrou inferior a todos os limites estabelecidos pela legislação vigente. Somente o Fe excedeu o limite de consumo da Portaria 1469/2001, mas ainda apresentou valor inferior ao orientador de investigação para águas subterrâneas do CONAMA. Foi constatado também, que a quantidade excessiva de Fe não configura um problema de saúde e sim uma alteração estética da água.

Comparando os resultados com a literatura, percebeu-se que o método de lixiviação utilizado altera os resultados, sendo que a solução de extração da NBR 10005:2004 altera o pH, que por sua vez, afeta a lixiviação de metais da areia.

A areia da Tupy S.A apresentou resultados de uma forma geral, similares e muitas vezes inferior às concentrações encontradas pela literatura. Observou-se que os valores das concentrações totais das amostras sólidas não presumem os metais suscetíveis de lixiviação, não se devendo, portanto, relacionar um ensaio com outro.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho realizou os procedimentos de determinação de elementos traços com apenas uma amostra alcançando os resultados esperados para tal. Entretanto não foi possível identificar os efeitos das variações temporais do processo de fundição, o que implica em uma não representatividade dos resultados obtidos. O adequado é realizar ensaios com várias amostras a fim de compor uma base de dados, e estabelecer uma interpretação estatística das determinações de todos os resultados analíticos.

Há também, outros elementos metálicos regulamentados e frequentemente citados na literatura a serem determinados para uma avaliação completa dos possíveis efeitos à saúde e meio ambiente que a areia verde da fundição Tupy S.A pode causar.



## REFERÊNCIAS

ABIFA. Revista da Abifa, edição 132, mai. 2011a

\_\_\_\_\_. **Areias Descartadas de Fundição (ADF)**. Disponível em: <[www.solucoesadf.com.br](http://www.solucoesadf.com.br)>. Acesso em: 09 jun. 2011b.

\_\_\_\_\_. ABNT/CB-59 Revista da Abifa. Agosto, 2008. edição 99.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Classificação dos Resíduos Sólidos: Rio de Janeiro: 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos: Rio de Janeiro: 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos: Rio de Janeiro: 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10007**: Amostragem de Resíduos sólidos: Rio de Janeiro: 2004.

BINA, P. **Metodologia de Utilização de rejeitos industriais na pavimentação**: estudo de caso de uso de areia de fundição. Dissertação (Mestrado profissional em Habitação). Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. São Paulo, SP. 2002, cap.4.

BIOLO, S. M. **Reúso do resíduo de fundição areia verde na produção de blocos cerâmicos**. 2005, 162f. Dissertação Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Porto Alegre, RS.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Coordenadoria-Geral de Vigilância em Saúde Ambiental. **Portaria MS n.º 518/2004**. Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2005. 28f.

\_\_\_\_\_. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Portaria nº 1469/2001**: Aprova o controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2001. 32f.

CASTRO, P. C. de; FILHO E. D. B.; CASOTTI, B. P. **Indústria de fundição**: situação atual e perspectivas. 2010. BNDES Setorial 33, p. 121 -162.

CARNIN, R. L. P. **Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em misturas asfálticas**. 2008, 152p. Tese (Pós-graduação em Química). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR.

CHEGATTI, S. **Aplicação de resíduo de fundição em massa asfáltica, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas**. 2004, 137p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução Nº420/2009**. Data da legislação: 28/12/2009 - Publicação DOU nº 249, de 30/12/2009, págs. 81-84.

COUTINHO NETO, B. **Avaliação do Reaproveitamento da Areia de Fundição como agregado em misturas asfálticas densas**. Tese (Escola de Engenharia de São Carlos) Universidade de São Paulo. São Carlos. 2004, 293f.

DENG A.; TIKALSKY P.J. **Geotechnical and leaching properties of flowable fill incorporating waste foundry sand**. 2007

DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte). Instituto de pesquisas rodoviárias. **Pavimentação – Sub-base ou base de brita graduada simples - Especificação de serviço**. 2009. Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/normas/Brita-graduada.pdf>> Acesso em julho, 2011.

DUNGAN, R.S.; **Polycyclic aromatic hydrocarbons and phenolics in ferrous and non-ferrous waste foundry sands**. 2006, 7f.

DUNGAN R.S.; DEES N.H. **Metals in Waste Foundry Sand Assessment with Earthworms**. USDA-ARS, Environmental Management & Byproduct Utilization. USA 2006

DUNGAN R. S.; DEES N.H. **The characterization of total and leachable metals in foundry molding sands**. USDA-ARS, Environmental Management & Byproduct Utilization. USA 2008

DUNGAN, R. S.; CHANEY R. L.; BASTA N. T.; DAYTON E. A.; DAVIS C. M. **Risk Assessment of Spent Foundry Sands in Soil-Related Applications**. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service. School of Environment and Natural Resources, Ohio State University, Columbus, OH. United States Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste. Peer Review Draft. 2009, 182f.

EPA (Environmental Protection Agency). **Foundry Sand**. Disponível em <<http://www.epa.gov/osw/conservation/rrr/imr/foundry/>>. Acesso em: 11 jun. 2011.

\_\_\_\_\_.MÉTODO 3010A – SW 846/EPA (1992). **Acid Digestion of Aqueous Samples and Extracts for Total Metals for Analysis by FLAA or ICP Spectroscopy**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epawaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3010a.pdf>> Acesso em: jun. 2011.

\_\_\_\_\_.MÉTODO 3050B – SW 846 (1996). **Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils.** Disponível em: <<http://www.epa.gov/epawaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3050b.pdf>> Acesso em: jun. 2011.

\_\_\_\_\_.MÉTODO 7000B - SW 846 (2007a). **Flame Atomic Absorption Spectrophotometry.** Disponível em: <<http://www.epa.gov/epawaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/7000b.pdf>> Acesso em: jun. 2011.

\_\_\_\_\_. Sector Strategies Division Office of Policy, Economics, and Innovation. **Beneficial Reuse Of Foundry Sand: A review of State Practices and Regulations.** 2002, 39f.

\_\_\_\_\_. **Framework for Metals Risk Assessment.** Office of the Science Advisor Risk Assessment Forum Washington, DC. 2007b

FAGUNDES, A. B. **Mapeamento do Gerenciamento das Areias a Verde de Fundação no Estado do Paraná sob a Ótica da Produção mais Limpa:** uma Contribuição para o Estabelecimento de Estratégias. 2010, 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa, 2010.

FIRST (Foundry Industry Recycling Starts Today). **Foundry Sand Facts for Civil Engineers.** Report N° FHWA-IF-04-004. Maio, 2004.

GUIA MEIO AMBIENTE. Disponível em <<http://www.meioambiente.pro.br/agua/guia/quimica.htm>>. Acessado em julho de 2011.

GUNEY Y.; AYDILEK A. H.; DEMIRKAN M. M. **Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases**. 2006. Disponível em: <<http://www.aydilek.umd.edu/publications/documents/FoundSand.pdf>>. Acesso em julho de 2011.

INTERNACIONAL FINANCE CORPORATION - IFC - World Bank Group. **Environmental, Health, and Safety Guidelines for Foundries**. 2007.

JI S.; WAN L. FAN Z. **The Toxic Compounds and Leaching Characteristics of Spent Foundry Sands**. 2001

LEE T.; BENSON C. H. **Leaching Behavior of Green Sands from Gray-Iron Foundries Used for Reactive Barrier Applications**. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Wisconsin – USA. 2006

LINDSAY B. J.; LOGAN T.J. **Agricultural Reuse of Foundry Sand**. School of Natural Resources, The Ohio State University. 2006, 10f.

MODERN CASTING, 44<sup>th</sup> Census of World Casting Production. EUA, Dez./2010.

MOREIRA, M. T. de O. T. **Contaminação ambiental associada às areias residuais de fundição**. 2004, 235f. Tese (Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

OWENS, G. **Development of policies for the handling, disposal and/or beneficial reuse of used foundry sands** – a literature review. Centre for Environmental Risk Assessment and Remediation (CERAR), University of South of Australia. Report n° 07. April, 2008.

PEIXOTO, F. **Regeneração térmica da areia ligada quimicamente.** 2003, 135f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia de Materiais e Processos avançados) Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, SC.

QUISSINI, C. S. **Aplicação de areia descartada de fundição como material alternativo para camada de cobertura de aterro de resíduos.** 2009, 84f. Dissertação (Programa de pós-graduação em Materiais) Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS.

SCHEUNEMANN, R. **Regeneração de areia de fundição através de tratamento químico via processo fenton.** 2005, 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

SIDDIQUE, R. **Waste and By-Products in Concrete (Engineering Materials).** 2007, capítulo 12.

SIDDIQUE, R.; NOUMOWE, A. **Utilization of spent foundry sand in controlled low-strength materials and concrete.** Resources, Conservation and Recycling 53. 2008, 9f.

SIDDIQUE, R.; KAUR, G.; RAJOR, A. **Waste foundry sand and its leachate characteristics.** Resources, Conservation and Recycling 54. 2010, 10f. (1027 – 1036).

SILVA, T. C. **Comparativo entre os regulamentos existentes para reutilização de resíduos de fundição.** 2007, 56f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

TIKASLKY P. J.; BAHIA H. U.; DENG A.; SNYDER T. **Excess Foundry Sand Characterization and Experimental Investigation in Controlled Low-Strength Material and Hot-Mixing Asphalt.** Prepared for U.S. Department of Energy, Contract No. DE-FC36-01ID13974. Pennsylvania Transportation Institute. 486f., Outubro, 2004. (Final Report).

STEHOUWER R.C.; HINDMAN J.M.; MACDONALD K.E. **Nutrient and Trace Element Dynamics in Blended Topsoils Containing Spent Foundry Sand and Compost.** The Pennsylvania State University, EUA. 2010, 9f.

TUPY. Disponível em: <<http://www.tupy.com.br/portugues/home/index.php>> Acesso em: 16 jun. 2011.

WINKLER, E. S.; BOL'SHAKOV, A. A. **Characterization of foundry sand waste.** Massachusetts: Chelsea Center for Recycling and Economic Development, 82 f., March, 1999. (Technical Report number 8).

\_\_\_\_\_.; KOSANOVIC, B.; GENOVESE, T.; ROTH, I. **A Survey of foundry participation in the Massachusetts: beneficial use determination process.** Massachusetts: Chelsea Center for Recycling and Economic Development, 59 f. October, 2000. (Technical Report number 31).