



# **UFBA**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**

**ESCOLA POLITÉCNICA**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI**

**MEPLIM**

**MESTRADO PROFISSIONAL EM  
GERENCIAMENTO E TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS NO PROCESSO PRODUTIVO**

**LUIZ ROGÉRIO NATIVIDADE LOPES**

**AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DOS RESÍDUOS  
SÓLIDOS DE AREIA RESINADA EM FUNDIÇÃO DE  
AÇO ATRAVÉS DE RECUPERAÇÃO TÉRMICA**



**SALVADOR  
2009**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**

**ESCOLA POLITÉCNICA  
MESTRADO PROFISSIONAL GERENCIAMENTO E TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS NO PROCESSO PRODUTIVO**

**LUIZ ROGÉRIO NATIVIDADE LOPES**

**AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DE AREIA  
RESINADA EM FUNDIÇÃO DE AÇO ATRAVÉS DE RECUPERAÇÃO  
TÉRMICA**

Salvador  
2009

**LUIZ ROGÉRIO NATIVIDADE LOPES**

**AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DE AREIA  
RESINADA EM FUNDIÇÃO DE AÇO ATRAVÉS DE RECUPERAÇÃO  
TÉRMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Dr. Silvio Alexandre Beisl Vieira de Melo

Salvador  
2009

---

L864 Lopes, Luiz Rogério Natividade

Avaliação da redução dos resíduos sólidos de areia resinada em fundição de aço através de recuperação térmica / Luiz Rogério Natividade Lopes. - Salvador, 2009.  
94 f. :Il. color.

Orientador: Dr. Silvio Alexandre Beisl Vieira de Melo  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Bahia.  
Escola Politécnica, 2009.

1. Resíduos industriais. 2. Impacto ambiental. 3. Fundição.  
I. Melo, Silvio Alexandre Beisl Vieira de. II. Título.

CDD:628.54

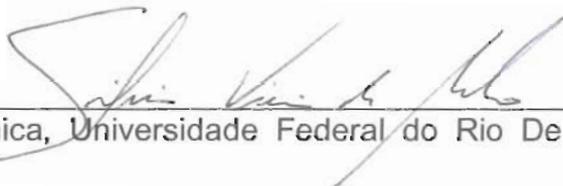
---

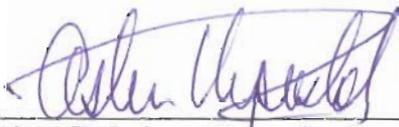
TERMO DE APROVAÇÃO

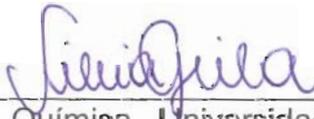
LUIZ ROGÉRIO NATIVIDADE LOPES

**“AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DE AREIA  
RESINADA EM FUNDIÇÃO DE AÇO ATRAVÉS DE RECUPERAÇÃO  
TÉRMICA”**

Dissertação aprovada como requisito para obtenção do grau de Mestre em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo – Ênfase em Produção Limpa, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora:

Sílvio Alexandre Vieira de Melo   
Doutorado em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio De Janeiro, UFRJ, 1997.

Asher Kiperstok   
Doutorado em Engenharia Química Tecnologias Ambientais, University Of Manchester, Institute Of Science and Technology, UMIST, Inglaterra, 1996.

Sílvia Gabriela Schrank   
Doutorado em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2003.

Salvador, 27 de março de 2009.

A

Meus pais, que sempre me apoiaram em todos os projetos da minha vida.

Minha esposa, que tem me estimulado e colaborado para meu desenvolvimento profissional e pessoal desde que a conheci.

Minha filha, que tem me proporcionado forças para enfrentar os desafios desta etapa da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço à minha esposa, por me apoiar e por compreender eu ter dispensado mais tempo ao curso do que a ela durante a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Dr. Silvio A. B. Vieira de Melo, pelo conhecimento que me passou e pela sua compreensão em momentos difíceis durante o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Sr. Carlos Silva, pelo apoio técnico fornecido por meio das longas conversas sobre o assunto.

Ao engenheiro Paulo Schenekenberg, pela sua contribuição sobre o assunto tratado (fundição), pelo fornecimento de materiais e apoio técnico.

Ao engenheiro Eduardo Cesana, que me ajudou nos momentos de dúvidas quanto ao processo de calcinação.

Ao engenheiro Sidney Roberto de Andrade, que além de fornecer informações valiosas para a pesquisa, indicou caminhos para eu obter dados e conhecer opiniões que muito contribuíram para a conclusão deste estudo.

Ao engenheiro Roberto Lopes de Castro, que me esclareceu muitas dúvidas e me indicou muitas fontes de conhecimento sobre resinas.

## RESUMO

Esta dissertação descreve o estudo realizado para avaliar os impactos ambientais num processo de fundição de aços carbono, ligas e inox no que se relaciona ao uso de areia com resina fenólica uretânica e apresenta algumas propostas para reduzi-los. A escolha desse tema se deve ao fato de o principal impacto ambiental gerado numa fundição ser proveniente do descarte de areia resinada. A metodologia de trabalho envolveu o levantamento de dados técnicos do processo de fundição, suas características, e de dados sobre as avaliações de impactos ambientais dessa atividade. Durante o processo de fundição, para que os moldes tenham a resistência mecânica necessária, eles são confeccionados com areia e resina. O descarte posterior desse material causa um impacto ambiental significativo. O processo de recuperação térmica tem por objetivo diminuir o descarte de areia resinada fenólica a números próximos de zero. Esta pesquisa compara os impactos ambientais da fundição, sem o processo de recuperação térmica e com o processo de recuperação térmica da areia, em particular os que ocorrem no processo de calcinação da areia resinada, tais como geração de gases para atmosfera, geração de calor, uso de combustível etc. Os resultados deste trabalho demonstram de forma quantitativa as vantagens e desvantagens dessa tecnologia. O trabalho apresenta ainda sugestões de usos alternativos da areia resinada descartada, tais como: a fabricação de blocos na construção civil, uso em asfalto etc.

**Palavras-chave:** Resíduos industriais, impactos ambientais, fundição

## ABSTRACT

This work aims to study, evaluate and present proposals for the reduction of environmental impacts in a process of carbon and stainless steel casting focusing on the sand use with phenolic resin. The choice of this focus is due to the main environmental impact generated in a casting to be proceeding from the drawn resin from sand discharge. The methodology adopted in this work includes collecting process data with characteristics of the casting and evaluation of environmental impacts in order to understand the casting process, the sand recovery process and later its use to evaluate the environmental impacts. During the casting process the molds confectioned with sand and resin, to give the desired mechanical resistance, cause significative environmental impact due to their discharge. The objective of recovery process is to diminish the drawn phenolic resin from sand discharge to zero level. Both the environmental impact that is with and without thermal recovery process are evaluated and compared, particularly in the process of calcination of the drawn resin from sand, such as, generation of gases for atmosphere, heat generation, combustibile. Suggestions also are presented alternative uses. Besides the evaluation of the environmental impacts in a casting with and without the process of sand recovery, the result of this work shows quantitatively the advantages and disadvantages of this technology. Alternatives are also presented to discharges, in order to minimize the environmental impacts even with them.

**Keywords:** Industrial waste, environmental impacts, foundry.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de areia de sílica	31
Tabela 2 - Amostras para ensaio de classificação resíduo	42
Tabela 3 - Volumes gerados de areia resinada	45
Tabela 4 - Volumes de areia calcinada resinada	46
Tabela 5 - Custo mensal de descarte de areia resinada	47
Tabela 6 - Características de controle da areia nova	65
Tabela 7 - Características de controle da areia recuperada mecanicamente	66
Tabela 8 - Características de controle da areia recuperada termicamente	66

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Características gerais da sílica	31
Quadro 2 - Característica resina fenólica uretânica - Parte 1	34
Quadro 3 - Característica resina fenólica uretânica - Parte 2	34

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista de fundição	11
Figura 2 - Forno de indução	11
Figura 3 - Vista da fábrica	12
Figura 4 - Centros de usinagem	12
Figura 5 - Gráfico de produção mundial de fundidos 1994	13
Figura 6 - Gráfico de participação mundial de produção de fundidos 1994	13
Figura 7 - Gráfico de produção de fundidos no Brasil por região 1995	14
Figura 8 - Gráfico de produção de fundidos no Brasil de 1990 a 2002	15
Figura 9 - Gráfico de produção de fundidos no Brasil por tipo de liga 2001	15
Figura 10 - Gráfico de distribuição setorial de fundidos no Brasil 1995	16
Figura 11 - Fluxo resumido processo de fundição - sem recuperação da areia	17
Figura 12 - Fluxo resumido processo de fundição - com recuperação da areia	17
Figura 13 - Esquema explicativo de modelo/caixa de macho	18
Figura 14 - Macro fluxo do processo de fundição de aço	20
Figura 15 - Exemplos de modelos e caixas de machos	21
Figura 16 - Modelo em caixa	22
Figura 17 - Fabricação do molde	22
Figura 18 - Molde e modelo (momento do destacamento)	22
Figura 19 - Pintura do molde	23
Figura 20 - Molde e macho no momento do fechamento	23
Figura 21 - Fusão material proveniente de sucata e ligas para atender as especificações	24
Figura 22 - Vazamento do metal líquido no molde	24
Figura 23 - Desmoldagem	25
Figura 24 - Reação da areia a base de sílica durante vazamento	30
Figura 25 - Esquema reacional de polimerização da resina fenólica	32
Figura 26 - Fluxograma - Caracterização e classificação de resíduos	41
Figura 27 - Planta do sistema de recuperação de areia	61
Figura 28 - Sistema de recuperação mecânica	62



## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ABIFA	Associação Brasileira de Fundição
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFS	Unidade de medida para definição granulométrica dos grãos de areia - American Foundry Society
ANDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EPA	Environmental Protection Agency
VMP	Valor máximo permitido

## SUMÁRIO

<b>I</b>	<b>DEDICATÓRIA</b>	i
<b>II</b>	<b>AGRADECIMENTOS</b>	ii
<b>III</b>	<b>RESUMO</b>	iii
<b>IV</b>	<b>ABSTRACT</b>	iv
<b>V</b>	<b>LISTA DE TABELAS</b>	v
<b>VI</b>	<b>LISTA DE QUADROS</b>	vi
<b>VII</b>	<b>LISTA DE FIGURAS</b>	vii
<b>VIII</b>	<b>LISTA SÍMBOLOS E ABREVIATURAS</b>	viii
<b>1</b>	<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO</b>	1
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	4
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO 3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA</b>	11
<b>3.1</b>	<b>Processo de fundição</b>	16
<b>3.2</b>	<b>Descrição do processo produtivo</b>	19
<b>3.2.1</b>	<i>Etapas do processo produtivo</i>	19
<b>3.2.2</b>	<i>Confecção do ferramental</i>	19
<b>3.2.3</b>	<i>Preparação do ferramental</i>	21
<b>3.2.4</b>	<i>Moldagem/macharia</i>	21
<b>3.2.5</b>	<i>Fusão e vazamento</i>	24
<b>3.2.6</b>	<i>Desmoldagem</i>	24
<b>3.2.7</b>	<i>Acabamento</i>	25
<b>3.2.8</b>	<i>Tratamento térmico</i>	25
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO 4 - INSUMOS E RESÍDUOS DO PROCESSO E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS</b>	26
<b>4.1</b>	<b>Principais insumos da fundição</b>	26
<b>4.2</b>	<b>Principais impactos ambientais</b>	35
<b>4.2.1</b>	<i>Resíduos sólidos</i>	35
<b>4.2.2</b>	<i>Efluentes líquidos</i>	37
<b>4.2.3</b>	<i>Emissões gasosas</i>	38

4.3	Problemas ambientais da areia de fundição	38
4.4	Classificação de resíduos sólidos	39
4.5	Classificação do resíduo de areia resinada	42
4.6	Estudo quantitativo da geração de areia resinada	44
4.7	Custos envolvidos	46
4.8	Processo de recuperação	48
4.8.1	<i>Tratamento mecânico</i>	49
4.8.1	<i>Tratamento térmico</i>	50
4.9	Processos alternativos	51
4.9.1	<i>Alternativa do reuso da areia de fundição</i>	51
4.9.2	<i>Processos de regeneração alternativos</i>	52
4.9.3	<i>Processos de moldagem alternativos</i>	52
4.9.4	<i>Tipos de moldes alternativos</i>	53
4.9.5	<i>Tipos de aglomerantes químicos alternativos</i>	55
4.10	Equipamentos e processos	59
4.11	Controle das características da areia	64
4.12	Ensaio realizados na areia do processo de fabricação	65
4.13	Resultados e discussões	67
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	69
5.1	Conclusões	69
5.2	Sugestões	69
	REFERÊNCIAS	71

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Na história da produção industrial, têm-se observado evoluções significativas em termos de tecnologia, métodos de produção, em estratégias de logística e em outros aspectos, que impulsionaram as indústrias em geral a patamares que as tornaram extremamente competitivas e lucrativas. Essas evoluções foram ocorrendo de forma cada vez mais rápida como, por exemplo, após a Primeira Guerra Mundial, quando Henry Ford e Alfred Sloan deram o impulso para o desenvolvimento da produção em massa. Já a indústria japonesa contribuiu com o modelo de produção enxuta, entre outras evoluções que prepararam as organizações para a concorrência mundial.

Conforme Moura (2000), durante anos, os modelos de administração de produção foram evoluindo, mas sem mostrar nenhuma preocupação com o meio ambiente, sendo a poluição em alguns momentos até mesmo considerada um indicador de desenvolvimento.

Quando a poluição ambiental começou enfim a ser considerada algo que, além desenvolvimento, também trazia problemas, as questões ambientais começaram a surgir. Inicialmente, a preocupação com o meio ambiente estava baseada numa visão denominada “fim de tubo”, cujo foco estava no descarte dos resíduos gerados, de maneira a minimizar os impactos ambientais. Hoje, já se tem a visão preventiva, a partir da qual se utilizam algumas tecnologias para evitar a geração de resíduos. As organizações perceberam que, além de a problemática ambiental ser uma questão de sobrevivência, considerá-la poderá trazer vantagens em um mundo industrial extremamente competitivo. Tais vantagens poderão ser: a redução do uso de matéria-prima e insumos, do consumo de energia e, conseqüentemente, dos custos.

Durante muito tempo, o autor desta dissertação trabalhou em empresas que tinham como principal matéria-prima os componentes fundidos, tendo realizado inúmeras visitas a vários fabricantes de fundidos em todo o Brasil. Após alguns anos, teve a oportunidade de trabalhar no desenvolvimento de uma nova fundição, onde foram instalados equipamentos mais modernos no processo produtivo da empresa.

Dado o seu grande interesse na área ambiental, decidiu estudar esse assunto. Ao perceber que estava trabalhando em um segmento da indústria com um grande potencial poluidor, mas em uma empresa que estava adquirindo equipamentos com novas tecnologias,

ou seja, tecnologias que podem prevenir a geração de resíduos, compreendeu estar de posse de todas as ferramentas necessárias para desenvolver um trabalho sobre esse tema.

Assim, esta dissertação apresenta uma avaliação da redução dos impactos ambientais em uma fundição de aço, através do estudo de um processo de recuperação que tem por objetivo diminuir o descarte de areia resinada fenólica a números próximos de zero. No estudo, são comparados os impactos ambientais sem e com o processo de recuperação térmica, visto que também há impactos ambientais no processo de calcinação da areia resinada, tais como geração de gases para atmosfera, geração de calor, uso de combustível etc. São apresentadas também sugestões de usos alternativos para a areia resinada descartada, tais como a fabricação de blocos para construção civil, o uso em asfalto etc.

O resultado deste trabalho, além da avaliação dos impactos ambientais numa fundição com e sem o processo de recuperação de areia, demonstrando de forma quantitativa as vantagens e as desvantagens dessa tecnologia, traz também alternativas para os descartes gerados, de maneira a minimizar esses impactos. Esta dissertação compreende a avaliação dos impactos ambientais num segmento considerado poluente por causa da geração de resíduos, principalmente de resíduos sólidos. Ao longo dos anos, foram criadas algumas sistemáticas para diminuir os impactos ambientais gerados nos processos de fundição. No início, as sistemáticas seguiam a concepção “fim de tubo” e destinavam-se a controlar os impactos nos descartes. Atualmente existem algumas alternativas preventivas para minimizar ou reduzir a geração de resíduos.

Os estudos realizados nesta dissertação referem-se a um dos processos mais modernos de recuperação térmica instalado em plantas fabris no Brasil. O fato de a pesquisa estar sendo realizada em uma planta com aproximadamente um ano de funcionamento e que utiliza metodologias recentes propiciou que se dispusesse de um equipamento com um alto nível de atualização. A escolha do processo foi feita após um estudo preliminar que demonstrou que a principal emissão de resíduos numa fundição é proveniente da fabricação dos moldes utilizados durante o processo produtivo.

O objetivo principal desta pesquisa é a avaliação de duas situações de controle de impactos ambientais que se baseiam em dois conceitos distintos, fim de tubo e preventivo, e a comparação das suas vantagens e desvantagens.

Um dos objetivos específicos deste trabalho é a análise dos impactos ambientais gerados durante o processo produtivo de uma fundição. Para cumprir esse objetivo confrontam-se os resultados encontrados no processo produtivo sem a recuperação térmica de

areia – situação presente na maioria das fundições instaladas no Brasil –, ou os encontrados nos processos com uma recuperação térmica com baixa eficiência e baixo índice de recuperação, com os resultados obtidos no processo produtivo aqui estudado, em que se usa a recuperação térmica.

Outro objetivo específico deste trabalho é o estudo da redução de custos que a recuperação térmica da areia resinada irá trazer ao diminuir os custos com os descartes propriamente ditos e com a reposição de areia (nova areia a ser adicionada), além dos custos com os seus respectivos transportes.

Mesmo sem a recuperação térmica, o limitante do grau de reutilização da areia resinada é exatamente o início do surgimento de problemas de qualidade decorrentes da alteração das características da areia moldada, resultante do acúmulo dos componentes da resina a cada reutilização. Com a recuperação térmica, essas características retornam aos padrões estabelecidos e, conseqüentemente, a qualidade dos produtos gerados no processo ficará garantida. Por essa razão, observa-se o aumento do grau da qualidade dos produtos quando se faz a recuperação térmica da areia.

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, incluindo este. No capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica. No capítulo 3, é feita a caracterização do problema industrial, foco deste trabalho, a apresentação do panorama mundial e brasileiro do mercado de fundição e a descrição do processo de fundição. No capítulo 4, são apresentados os insumos, os resíduos da indústria de fundição, os respectivos impactos ambientais relacionados, os métodos de tratamento utilizados na regeneração da areia de fundição, a apresentação de alternativas de uso da areia de fundição, bem como processos alternativos diversos, os resultados do balanço de massa e as discussões dos mesmos. No capítulo 5, são apresentadas as conclusões e as principais sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A evolução dos métodos de fabricação está diretamente ligada à área ambiental, mais precisamente aos problemas ambientais.

Até a Revolução Industrial, os impactos ambientais eram basicamente devido à extração dos recursos naturais necessários para a matéria-prima dos produtos fabricados artesanalmente. A partir da Revolução Industrial, além da matéria-prima consumida, começaram a surgir os resíduos dos processos produtivos. As principais causas eram – e continuam sendo embora em menor proporção: a baixa eficiência dos processos, os desperdícios, a falta de preocupação com redução de consumo de matéria-prima e demais recursos utilizados na fabricação e a baixa qualidade dos produtos produzidos, gerando assim um grande índice de sucateamento.

Segundo Moura (2000, p. 1), *“o homem sempre utilizou os recursos minerais do planeta e gerou resíduo com baixíssimo nível de preocupação: os recursos eram abundantes e a natureza aceitava sem reclamar os despejos realizados, já que o enfoque sempre foi ‘diluir e dispersar’”*. Esta afirmação nos faz perceber como homem sempre utilizou recursos e gerou resíduos sem preocupação com os efeitos futuros.

Com o passar do tempo, começaram a surgir problemas e alguns acidentes começaram a sinalizar os efeitos colaterais da alteração do meio ambiente realizada pelo homem. Conforme Moura (2000, p. 1), *“foi a partir da década de 60 que começou a mudar a situação”*. *“Alguns recursos passaram a ser mais valorizados com o aumento da população e do consumo, visualizando-se o seu esgotamento futuro”*. Com o passar dos anos, constatou-se que o meio ambiente começava a sentir as décadas de agressões. Percebeu-se que se algo não fosse feito as consequências seriam desastrosas.

Ainda de acordo com Moura (2000), acidentes ocorridos nas décadas de 60 e 70 – como, por exemplo, a contaminação da Baía de Minamata no Japão – contribuíram para conscientização sobre a questão ambiental.

Em 1972 houve a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente em Estocolmo, com participação de 113 países. Nessa conferência houve uma divisão entre países ricos e pobres, sendo que os países ricos defendiam controles rígidos, e os países pobres interpretavam estes controles como sendo um problema para seu desenvolvimento.

Na década de 70, surgiu o conceito de “desenvolvimento sustentável”, bem como, em 1978 na Alemanha, o “selo ecológico” chamado “Anjo azul (*Blauer Engel*)”, com o qual os produtos ambientalmente corretos eram rotulados. Nessa década também, a Environmental Protection Agency - EPA iniciou nos Estados Unidos a exigência do estudo de impacto ambiental para aprovação de um novo empreendimento.

Segundo foi definido pela Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento (1987), desenvolvimento sustentável é o “*desenvolvimento que atende as necessidades da geração presente, sem o comprometimento das possibilidades de as gerações futuras em atenderem as suas necessidades*”.

Verifica-se que durante décadas e até séculos as agressões ao meio ambiente aconteceram sem que houvesse nenhuma preocupação com o futuro. Depois de vários acidentes, tendo como vítimas as pessoas, os animais e o meio ambiente, começou a surgir uma inquietação sobre a existência futura. Estudos demonstram que deveria haver uma preocupação maior, pois a velocidade necessária para reduzir o consumo de matéria-prima e a geração de resíduos poderá não ser suficiente, haja vista a afirmação de Graedel e Allenby (1995), que definem o impacto ambiental total como sendo um produto de três termos: “população da terra x padrão de vida material per capita x eficiência ambiental”.

Tem-se observado o aumento da população mundial, bem como a elevação do padrão de vida material. Assim, a variável capaz de reduzir o impacto ambiental é a melhoria da eficiência ambiental, ou seja, o investimento em pesquisa e tecnologia para diminuir o impactos ambientais. Uma outra oportunidade de redução dos impactos ambientais é a conscientização sobre o “consumo capitalista”, ou seja, o consumo sem a real necessidade, baseado apenas no marketing e no status. Nesse sentido, Marinho e Kiperstok (2000) afirmam que existe a necessidade de uma resposta mais eficaz ao problema do impacto ambiental e que o processo produtivo vem priorizando ações que visam à minimização da geração de resíduos, em vez de apenas tratá-los para disposição no meio ambiente. Cada vez mais os impactos ambientais provocados pelo homem vêm gerando resposta de adaptação do meio ambiente à situação atual. Caso não sejam tomadas ações de diminuição dos impactos ambientais, os problemas hoje enfrentados tendem a crescer. Ações apenas de tratamento de resíduos não são mais eficazes para a atual situação.

Conforme citado por Marinho (2001), entende-se por “*fim de tubo*’ as tecnologias de controle da poluição (tratamento de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas) utilizadas ao final dos processos produtivos para atender exigências legais”. O

conceito de fim de tubo, ou seja, tratar o resíduo em vez de prevenir a sua geração ainda é aceito pela legislação, que mostra apenas pequenos avanços nesse sentido.

A redução dos custos de produção e o potencial retorno financeiro com a reciclagem de produtos têm fomentado o interesse na redução do consumo de matéria-prima em geral assim como o aumento da reutilização de produtos anteriormente considerados lixo. Conforme lembra Peixoto (2003), um exemplo típico é o da reciclagem de embalagens, principalmente latas de alumínio e garrafas PET, as quais colaboram significativamente para a economia de energia e geração de receita, melhorando o padrão de vida de famílias de baixa renda. Verifica-se que quanto maior o valor agregado maior é o interesse na reciclagem, como é justamente o caso de latas de alumínio de bebidas em geral.

Observa-se ainda que os altos custos para o tratamento dos resíduos têm fomentado pesquisas em busca de tecnologias e métodos produtivos preventivos. Além dos custos, a pressão do cliente demandando as empresas com visão ecologicamente correta tem ajudado nessa questão.

Em alguns casos a prevenção da poluição enfrenta desafios insuperáveis para os dias atuais. Um exemplo é a poluição em locais com alta densidade populacional. Países como a China enfrentam problemas tais como: poluição atmosférica, escassez de água etc., que chegam a ser considerados problemas de saúde pública. Nesse caso, a solução é ainda mais complicada por este ser um país com grande crescimento econômico e, conseqüentemente, ter um grande consumo de matéria-prima e de energia. Segundo Hao e Wang (2007), estima-se que as centrais elétricas são responsáveis por cerca de 50% de emissões de SO<sub>2</sub>. Alterar este quadro é uma tarefa complexa e de interesse mundial. Isso reforça que tomar decisões, realizar pesquisas e fazer investimentos pesados são ações necessárias para que possamos diminuir a emissão de poluentes e acelerar o processo de redução de agressões ao meio ambiente.

No meio industrial os desafios não são diferentes. Segundo Fatta e outros (2004), os processos industriais ainda representam uma parte considerável da total da poluição. Portanto, é de suma importância reduzir esses impactos ambientais.

A legislação dos países mais desenvolvidos tem sido cada vez mais rigorosa quanto à agressão ao meio ambiente. A União Européia, por exemplo, tem um conjunto de regras comuns em matéria de licenciamento das instalações industriais. A prevenção da poluição tem sido o foco dessas regras e não a dependência de ações de fim de tubo. Grupos de estudos têm

sido criados para pesquisar alternativas tecnológicas para prevenir a poluição em diferentes segmentos da indústria, incluindo a fundição.

Segundo Fatta e outros (2004), durante as últimas décadas têm ocorrido significativas mudanças nos processos das indústrias, visando reduzir os impactos ambientais. No entanto, as ações tomadas até o momento são insuficientes para uma redução aos níveis necessários.

De acordo com Peixoto (2003), *“Nos últimos anos, a indústria de fundição foi profundamente afetada devido ao impacto das novas regulamentações ambientais, elaboradas para as emissões líquidas, sólidas e gasosas, leis que contribuíram para o declínio do número de fundições domésticas e reduziram a lucratividade das sobreviventes.”*. Esta mudança no mercado ocorreu devido aos custos advindos das exigências das novas leis ambientais. Isso conseqüentemente força a realização de pesquisas e investimentos visando à redução do consumo de matéria-prima e, principalmente, do descarte de produtos perigosos, operação de custo mais elevado.

Ainda segundo Peixoto (2003), *“O termo ‘areia ligada quimicamente’ aplica-se a uma grande variedade de matérias-primas de moldagem e macharia que utilizam ligantes orgânicos (tais como resinas furânicas, fenólicas, uretânicas) inorgânicos (como silicato de sódio e o cimento portland) e mistos (como resinas fenólicas alcalinas), sendo empregados na maioria das fundições”*.

Existem diversos meios de prover à areia a resistência mecânica necessária, ou seja, ser o agente aglomerante da areia para possibilitar a confecção dos moldes e machos de fundição. O foco desta dissertação é a areia ligada quimicamente por meio de resina fenólica uretânica. De acordo com Scheunemann (2005), a areia contaminada com resina fenólica, gerada na desmoldagem dos componentes fundidos nas indústrias de fundição, é atualmente um grave problema ambiental, exigindo grandes investimentos para haver mudanças que levem à melhoria da eficiência ambiental no setor. Nas empresas de pequeno e médio porte, o principal limitante para que essas mudanças ocorram é o investimento de valores significativos no processo produtivo, mas nas fundições de grande porte é possível observar respostas mais rápidas no que se refere a mudanças estratégicas.

Conforme Koyuncu e Demirbas (2006), a classificação do resíduo, ou seja, do nível de toxicidade da areia de fundição, depende de alguns fatores, tais como: a liga fundida, o processo de moldagem e o tipo de aglomerante utilizado. Independentemente desses fatores, o reúso da areia é uma das alternativas a ser utilizada. A aplicação das areias de fundição na construção de aterros, taludes e calçadas e o seu uso como aditivo em materiais como

cimento, por exemplo, são economicamente interessantes, pois levam à economia no custo de descarte do resíduo gerado e à diminuição das pressões dos órgãos ambientais, as quais tendem a aumentar. Entretanto, essas opções para se reutilizar a areia descartada não constituem uma ação preventiva, além de haver a necessidade de reposição da quantidade da areia que se destinou a essas aplicações.

Em vários segmentos, empresas que utilizam componentes fundidos como matéria-prima também têm utilizado as ferramentas de gestão para forçar as fundições a aumentarem sua preocupação com o meio ambiente. Uma dessas ferramentas de gestão tem sido exigência de um sistema de gestão ambiental certificado, conforme norma ISO 14001, que deve ser certificada por um órgão independente e reconhecido.

Segundo Prosanto (2008), grande parte das fundições na Índia, assim como no Brasil, é constituída de empresas de pequeno porte e possui pouca tecnologia incorporada ao processo de fabricação. Também não existe um intercâmbio de informações entre essas empresas para o compartilhamento de experiências e tecnologias bem-sucedidas.

Hoje se pode observar que, tanto no segmento de fundição quanto nos demais segmentos produtivos, as questões ambientais deixaram de ser um ponto negativo, contra o próprio negócio, e passaram a ser uma ferramenta de redução de custos e um ponto positivo para a marca do produto.

A questão ambiental só pode ser avaliada de forma completa se for considerada também a questão econômica. Segundo Pearce (1993), as avaliações ambientais não estariam completas sem uma valoração econômica. Por este motivo a questão ambiental tem se tornado uma questão estratégica em grandes organizações. De acordo com Porter e Van der Linde (1995), as empresas devem aprender a visualizar o benefício ambiental em termos de produtividade dos recursos. A geração de resíduos e o consumo elevado de recursos naturais devem ser considerados como ineficiência do processo e quase sempre uma forma de desperdício.

Segundo Bonet (2002), *“A indústria da fundição é conhecida como altamente poluidora, talvez, pelo fato de ser confundida com o setor siderúrgico, ou também pelo fato de em décadas anteriores, despejarem seus poluentes na atmosfera, através dos seus fornos de fusão. Hoje, o grande problema das empresas de fundição são os seus resíduos sólidos, constituídos dos excedentes das areias usadas na confecção dos moldes e machos”*. Os grandes volumes de resíduos bem como os impactos ambientais gerados por esses resíduos

tornam a fundição uma grande fonte de poluição, considerando que essa atividade utiliza insumos perigosos.

Ainda segundo Bonet (2002), *“A disposição dos resíduos de areias de fundição em aterros industriais, quando não monitorado, gera um sério problema ambiental, devido ao volume produzido. Além disso, acarreta um problema adicional, pois os órgãos e regulamentos ambientais estão obrigando as empresas a destinarem seus resíduos em aterros cada vez mais distantes do local gerado, aumentando consideravelmente os custos envolvidos”*. Quando o processo produtivo de uma fundição não possui o recurso de uma recuperação térmica, ou possui equipamentos com baixo rendimento ou capacidade, ocorre a geração de uma grande quantidade de resíduos sólidos, provocando um grande problema ambiental e econômico, devido à necessidade de descarte fora dos grandes centros, por imposição dos órgãos ambientais. Nesse segmento, entre muito outros, a tecnologia “fim de tubo” acaba se tornando quase que inviável em todos os sentidos.

Segundo Dantas (2003), a indústria de fundição apesar de consumir sucatas metálicas como matéria-prima, gera grandes volumes de resíduos sólidos de areia resinada. Apesar de a grande maioria da matéria-prima utilizada pela fundição ser proveniente de materiais recicláveis, o que diminui os resíduos metálicos, os volumes gerados de areia com resina tornam o processo ineficiente. Esta afirmação refere-se à grande quantidade de areia para confecção dos moldes e machos, com produtos químicos poluidores e perigosos. Dentre os produtos químicos usados para a preparação dos moldes e dos machos, está um ligante químico que é misturado à areia.

Segundo Peixoto (2003), o Brasil produziu, em 1998, aproximadamente 1,7 milhão de toneladas de fundidos e utilizou entre 6 e 7 milhões de toneladas de areia para confeccionar seus moldes e machos. Um volume de 5 a 6 milhões de toneladas foi reciclado no processo e cerca de 1 milhão de toneladas foram descartadas. Dependendo da eficiência do processo de fundição, da tecnologia empregada na reciclagem, do tipo de areia e de aglomerante utilizados, estes números podem variar significativamente para mais ou para menos.

O processo de fundição pode ter sua eficiência melhorada na etapa de vazamento, se estiver previsto o uso de uma quantidade menor de areia. Essa medida preventiva, adotada ainda na fase de projeto, irá reduzir o consumo de areia, a quantidade de metal vazado e o volume de resina misturado à areia. A retirada de areia de rios e cavas causa grande impactos ambientais; além disso, a areia é considerada um bem não renovável. Segundo King e Eketi (1997), a retirada de areia em escavações altera vários parâmetros físico-químicos, tais como

aumento dos níveis de sólidos suspensos, a condutividade, a dureza total, o oxigênio dissolvido, e interfere em outros fatores que mudam e destroem o ecossistema existente.

O setor de fundição utiliza materiais de sucatas e, conseqüentemente, tem um importante papel na reciclagem. Por outro lado, as fundições têm um elevado potencial de agressão ao meio ambiente, mesmo aquelas que fizeram investimentos e em que tecnologias de redução de emissões de resíduos tenham sido empregadas. Em grande parte das fundições, a areia utilizada no processo, misturada com resina, não é recuperada, ou é recuperada em quantidade pequena. Com isso, parte da areia após uso é descartada, contendo uma resina que traz impactos ambientais e os aumenta os custos de produção devido ao descarte.

Conforme a Associação Brasileira de Fundição - ABIFA (2006), o Brasil gera quase dois milhões de toneladas anuais, sendo aproximadamente três quartos do total de resíduos gerados pela indústria de fundição. Desse modo, pode-se afirmar que o maior volume de resíduos gerados por uma fundição corresponde à areia utilizada. Os dados quantitativos e qualitativos diferenciam-se em razão das peculiaridades de cada processo. A areia utilizada na fundição é um grave problema ambiental para o Brasil, uma vez que o país é um dos mais importantes fornecedores de componentes fundidos, e, em muitas situações, para diminuir os custos, o descarte dessa areia é realizado em locais em desacordo com a legislação.

## CAPÍTULO 3

### CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A empresa escolhida para este estudo foi implantada na Bahia em 2003 após um planejamento estratégico. Possui duas unidades fabris, uma unidade de fundição e uma unidade de produção de válvulas, em 14.000 m<sup>2</sup> de área construída num terreno de 101 mil m<sup>2</sup> e um escritório comercial em São Paulo – SP.

A falta de investimentos nas indústrias instaladas no Brasil ao longo do tempo resultou em equipamentos obsoletos, alto grau de falhas internas e externas, escassez de bons fornecedores de peças fundidas e válvulas industriais e um deficiente atendimento a clientes de projeção mundial. Assim, as empresas brasileiras mostravam um distanciamento tecnológico em relação aos concorrentes estrangeiros.

No entanto, a perspectiva de um grande volume de investimentos no setor de petróleo, petroquímico e em vários outros segmentos da economia levou os sócios acionistas a elaborarem o projeto da empresa aqui em foco. A sua unidade fundição, com capacidade para fundir até 1000 toneladas/mês, possui uma planta industrial com processo produtivo automatizado, que permite uma grande produtividade, com os mais rígidos controles da qualidade.



Figura 1 - Vista da fundição



Figura 2 - Forno de indução

A unidade de produção de válvulas dispõe de um processo produtivo verticalizado, em que desenvolve os projetos de engenharia, confecciona os modelos, constrói os dispositivos para usinagem, tudo internamente e de forma integrada, com fundição própria e usinagem automatizada. A empresa projeta e produz válvulas para os mercados de petróleo, petroquímico, químico, papel e celulose, álcool e açúcar, siderúrgico, mineração, cogeração de gás, engenharia e indústrias em geral.



Figura 3 - Vista da fábrica



Figura 4 - Centros de usinagem

A empresa possui seu sistema de gestão da qualidade certificado conforme ISO 9001:2000, estando em processo inicial de implantação do sistema de gestão ambiental integrado conforme ISO 14001.

Apesar de a organização em questão ter duas unidades de negócios distintas (fundição e produção de válvulas), o foco desta pesquisa é somente o processo de fundição. A escolha desse tema ocorreu após um estudo inicial que demonstrou que o impacto ambiental da produção de válvulas é menor que o da fundição, pois o único resíduo (efluente líquido) com volume significativo gerado na fabricação de válvulas é óleo solúvel (aproximadamente 5% de óleo e 95% de água), mas em um volume que não ultrapassa 20m<sup>3</sup> por ano. Além disso, existem processos que permitem a separação da água e óleo.

Devido à complexidade do assunto, os impactos ambientais de um processo de fundição têm sido alvo de vários estudos, tais como: incorporação de areia de fundição em massa asfáltica, de Bonet (2002); reutilização da areia preta de fundição na construção civil, de Bonin (1994), regeneração de areia de fundição através de tratamento químico via processo Fenton, de Scheunemann (2005); estudo para minimização e reaproveitamento de resíduos sólidos de fundição, de Okida (2006); entre outros.

O grande impacto ambiental devido ao uso de produtos químicos com fenóis e o grande volume dos resíduos sólidos gerados pela necessidade frequente de retirar areia resinada do processo de fundição constituíram a motivação principal para esta dissertação.

A produção mundial de fundidos está próxima a 67 milhões de toneladas/ano, segundo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES (2008). A indústria de fundição no Brasil tem posição de destaque no cenário mundial de produção fundidos, estando entre os 10 maiores produtores mundiais (8º lugar), conforme pode ser observado na figura 5.

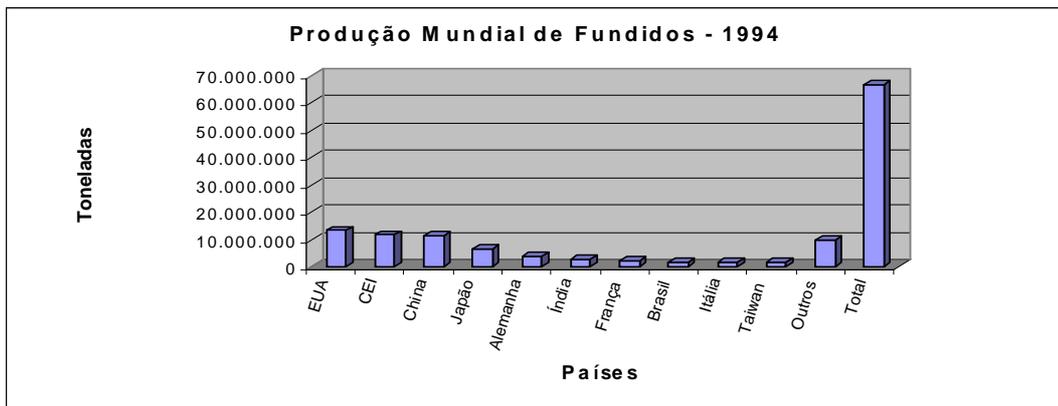


Figura 5 - Gráfico da produção mundial de fundidos 1994

Considerando sua participação no mercado mundial, isto representa em torno de 2,7% do volume de produção no mundo, conforme pode ser observado na figura 6.

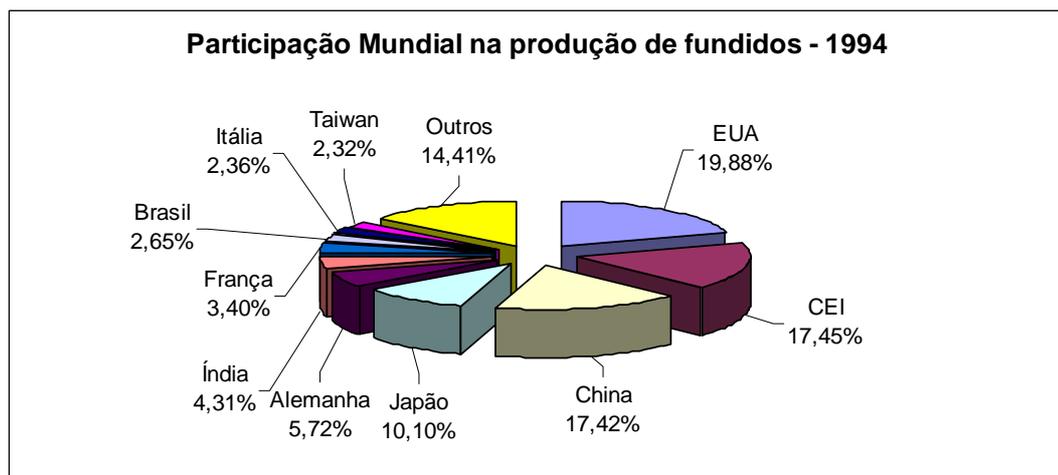


Figura 6 - Gráfico de participação mundial na produção de fundidos 1994

Conforme Associação Brasileira de Fundição - ABIFA (2006), a indústria de fundição nacional emprega cerca de 42.000 trabalhadores em cerca de 1000 empresas. Apesar de o setor de fundição ter um papel importante no Brasil, do ponto de vista de geração de emprego, o segmento é constituído de pequenas empresas que cresceram de forma desordenada e sem planejamento, principalmente nas questões ambientais. As empresas de grande porte, em que o planejamento estratégico já engloba a questão ambiental, constituem uma minoria.

As fundições no Brasil utilizam mão de obra não especializada no setor produtivo e pessoal altamente especializado nos setores técnicos. Um dos fatores da evolução do setor é o baixo custo em recursos fundamentais para este tipo de indústria, ou seja, mão de obra,

energia elétrica e matéria-prima (sucata), além da cobrança pouco significativa nos aspectos ambientais.

Conforme mostrado na figura 7, o Brasil tem algumas regiões de destaque na produção nacional de fundidos. O estado de São Paulo concentra a maior parte das empresas de fundição, devido à maior presença de indústrias que utilizam os componentes fundidos como matéria-prima. Já o estado de Minas Gerais detém uma grande quantidade de fundições, concentrando ali um importante polo de desenvolvimento e treinamento na área, tendo conseqüentemente uma grande quantidade de pessoas especializadas na área técnica. A região Sul possui também grande importância no setor, principalmente o estado de Santa Catarina, com as maiores empresas do segmento e grande representação na área de pesquisa e desenvolvimento. O estado do Rio de Janeiro tem uma representação menor no segmento, e a região Norte/Nordeste possui uma representação pouco importante para o cenário nacional.

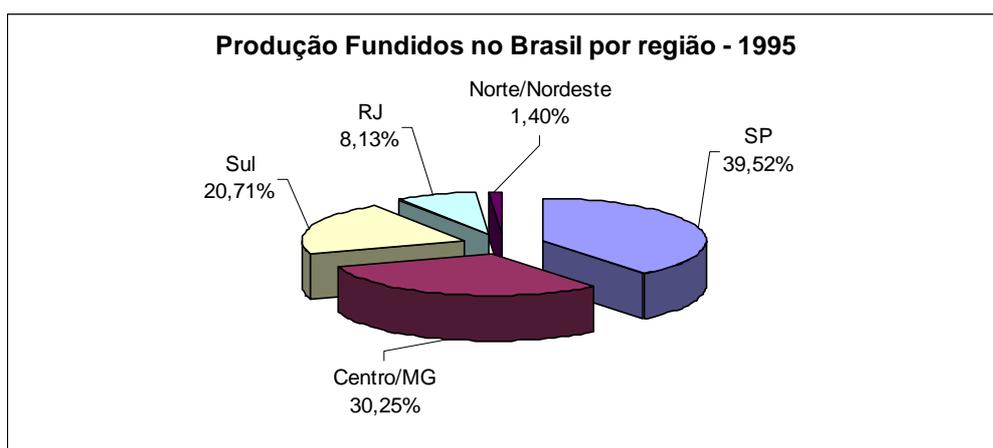


Figura 7 - Gráfico de produção de fundidos no Brasil por região 1995

Segundo o IEL-MG/SIFUMG (2003), ocorreu um pequeno aumento da produção entre os anos de 1993 e 1994. Isso pode ser observado na figura 8. De 1995 a 2002, a variação da produção foi pouco representativa na capacidade instalada, girando em torno de 1,8 milhão de toneladas/ano. Esta variação de produção entre os anos de 1995 até 2000 ocorreu devido a oscilações normais de produção.

Conforme o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES (2008), o volume de produção em 1994 propiciou uma receita de US\$ 2,7 bilhões. O quadro de estabilidade do volume de produção pode ser confirmado comparando-se o faturamento de US\$ 2,5 bilhões em 2006 com o de 1994, de acordo com a Associação Brasileira de Fundição - ABIFA (2006).

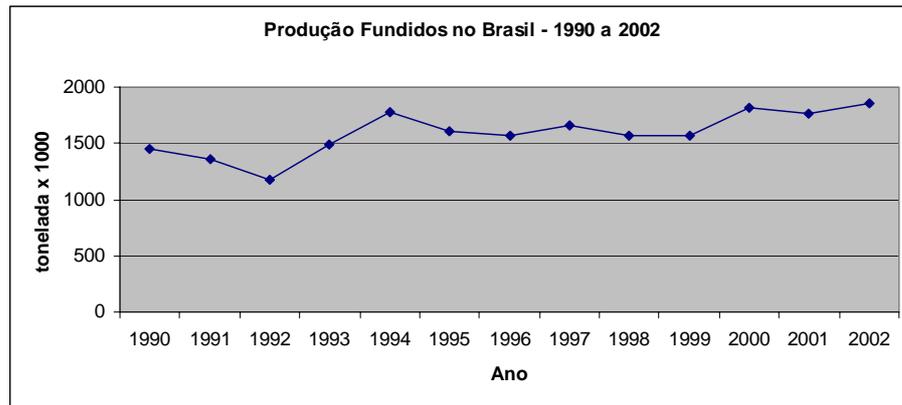


Figura 8 - Gráfico de produção de fundidos no Brasil de 1990 a 2002

Para se entender melhor a demanda de fundidos é necessário verificar a participação por tipo de liga nesse tipo de produção. De acordo com a figura 9, verifica-se que a grande demanda de liga é a de ferro fundido, segundo o BNDES (2008). O consumo de ferro fundido representa 86% do total produzido, seguido de 7% de alumínio. Já a produção nacional de fundidos de aço, que é o foco desta dissertação, fica em 5%. É importante frisar que para cada tipo de liga produzida as matérias-primas e processos de fundição mudam; conseqüentemente os impactos ambientais também são diferentes.



Figura 9 - Gráfico de produção de fundidos no Brasil por tipo de liga 2001

No Brasil, verifica-se que o grande consumidor de fundidos é o setor automotivo, quase 50% da produção nacional. Os demais segmentos importantes para o setor de fundição são: mecânico, exportação e siderúrgico, conforme mostra a figura 10.

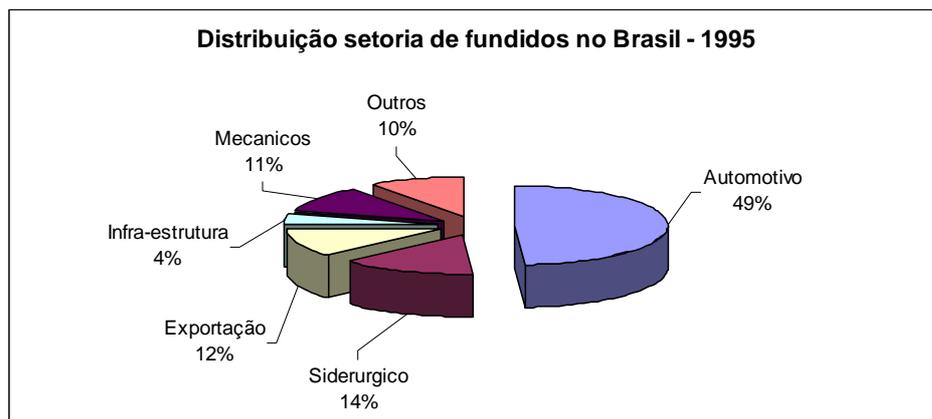


Figura 10 - Gráfico de distribuição setorial de fundidos no Brasil 1995

### 3.1 O Processo de fundição

Para se entender o problema-tema é preciso primeiramente conhecer o processo de fundição. A sua principal vantagem é fornecer componentes com formas e dimensões o mais próximo possível das requeridas, diminuindo assim o tempo em processos posteriores, como por exemplo, na usinagem, consequentemente diminui os custos de fabricação, mantendo características técnicas.

As características de componentes fundidos estão muito próximas de materiais similares obtidos por meio de processos de fabricação diferentes (forjados, laminados etc.), em que os tempos de usinagem normalmente são muitos maiores, gerando, portanto, custos que inexistem nos componentes fundidos. Por esses motivos, a utilização de componentes fundidos, na maioria dos casos, tem muitas vantagens quando comparada à de componentes oriundos de outros processos de fabricação. Os fluxogramas nas figuras 11 e 12 mostram, de forma resumida, o processo de fundição, indicando o caminho da utilização da areia/resina.

Segundo Lopes e Estrela (2003), o processo inicial é a construção do ferramental (modelo/caixa macho), no qual é reproduzida a geometria/dimensões do componente em questão. O modelo, dividido em 2 partes iguais (bipartido), copia a forma externa da peça. Já a caixa de macho copia a parte interna “oca” (furos, passagens etc.). São confeccionadas duas caixas com areia (moldagem) para que o formato da peça possa ser copiado, cada metade é uma caixa, conforme figura 13. Por este motivo o modelo deve ser bipartido. Quando é feita a união das duas caixas, obtém-se o desenho da peça. Para obtenção dos furos, deve ser feito o macho na caixa de macho, por meio do preenchimento desta caixa com areia. O macho deve ser colocado entre as duas caixas de areia que compõem o modelo, nas quais há locais específicos para a sua colocação.

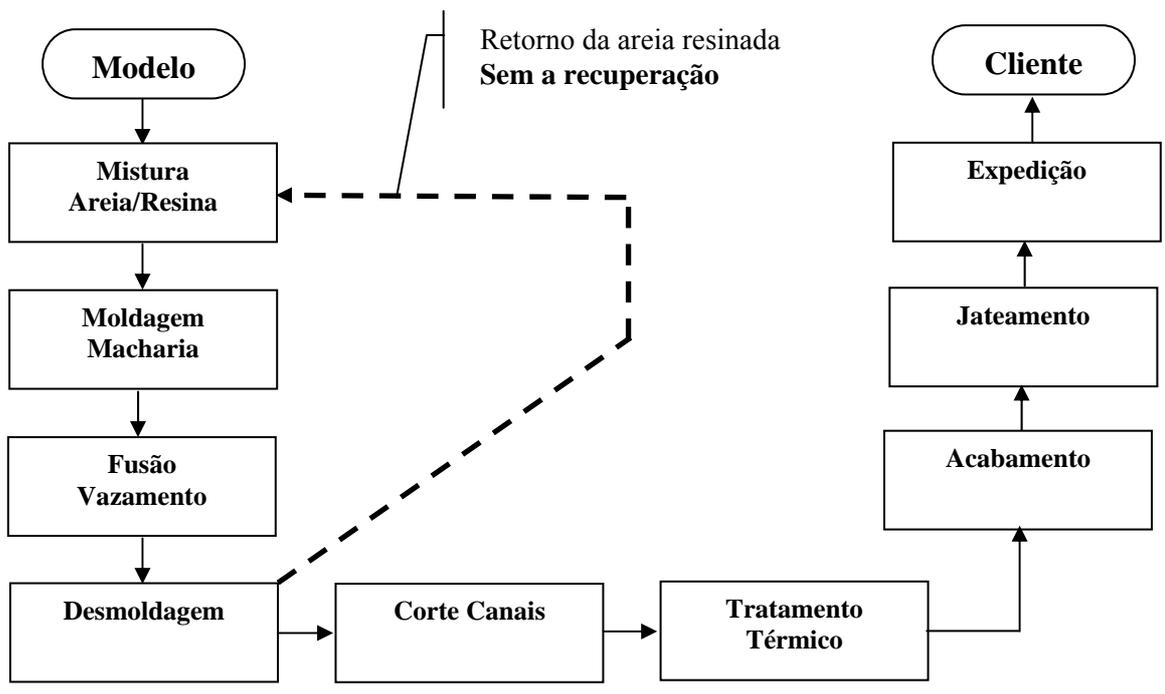


Figura 11 - Fluxo resumido do processo de fundição - sem recuperação da areia

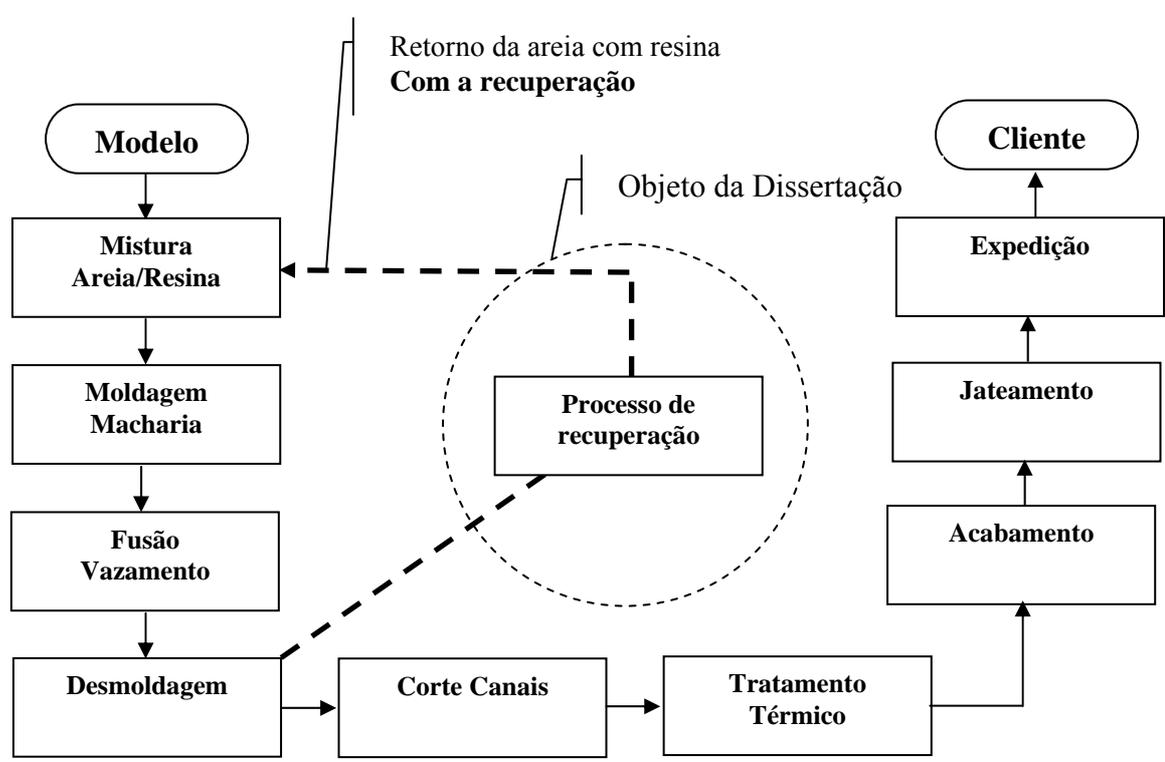


Figura 12 - Fluxo resumido do processo de fundição, com recuperação da areia

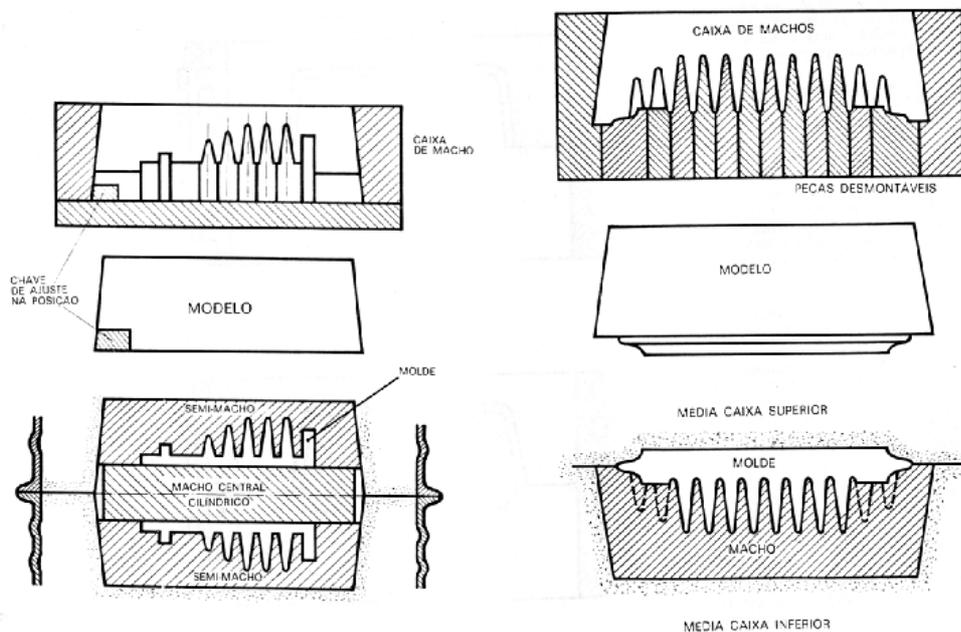


Figura 13 - Esquema explicativo de modelo/caixa de macho  
 Fonte: Lopes e Estrela (2003).

À areia utilizada nesta moldagem (o negativo do componente) é adicionada uma resina para que se obtenha a resistência mecânica necessária ao molde. O próximo passo é o derramamento do aço em estado líquido no molde, onde os espaços vazios são preenchidos. Após o resfriamento do aço (estado sólido), o componente fundido reproduz a geometria do modelo/macho. Os moldes são, então, quebrados; sendo os “pedaços” triturados para retorno ao sistema de areia. Depois, os canais de alimentação (no qual o metal líquido é distribuído ao componente) são cortados, e o tratamento térmico, acabamento e jateamento são realizados. Agora o componente fundido está pronto para inspeção e entrega.

Durante o processo de fundição existem vários impactos ambientais e vários resíduos são gerados, mas o problema em foco neste estudo está na areia e na resina utilizadas durante o processo. Esses componentes provocam o maior impacto ambiental e o maior volume de resíduo gerado. A areia tem o objetivo de reproduzir a geometria do modelo/caixa de macho e a resina o de aumentar a resistência mecânica do molde. Outros componentes utilizados no processo, como a tinta refratária pro exemplo, também são considerados.

Após a moldagem, o vazamento e a quebra do molde, a areia resinada é triturada e retorna ao misturador contínuo. Neste ponto começa o problema: a resina que foi adicionada no uso anterior se mantém agregada aos grãos de areia. Além disso, para que essa areia seja

reutilizada, é necessário se adicionar mais resina, o que vai alterar as suas características técnicas e impossibilitar o seu reuso de forma contínua.

Na hora do vazamento do aço no molde com areia reutilizada (com alto teor de resina), a areia resinada reage com metal em estado líquido (aproximadamente a 1680°C) formando defeitos inaceitáveis nos componentes fundidos. A solução nesse caso é retirar uma grande quantidade de areia resinada do sistema e acrescentar a mesma quantidade de areia nova. A areia retirada contém resina, tinta refratária, areia de crômica e outros componentes. Este é o fluxo apresentado no processo de fundição sem recuperação da areia ilustrado na figura 11.

Uma alternativa para evitar o desperdício de areia é o uso de um equipamento que permita a queima da resina, fazendo-a retornar ao estado inicial (sem a resina), conforme o fluxo apresentado do processo de fundição com recuperação da areia, na figura 12. Tal equipamento, chamado calcinador, eleva a temperatura da areia e volatiliza a resina que está agregada aos seus grãos.

Entretanto, o uso desse equipamento também traz alguns impactos ambientais, tais como:

- a) Consumo de energia (elétrica, gás, diesel etc.);
- b) Geração de gases provenientes da queima da resina contida na areia e
- c) Troca de calor com o meio ambiente.

## **3.2 Descrição do processo produtivo**

### ***3.2.1 Etapas do processo produtivo***

A figura 14 representa uma visão macro do fluxo do processo de fundição de aço. Cada etapa é descrita a seguir:

### ***3.2.2 Confecção do ferramental***

A confecção dos ferramentais é dividida em duas partes: o modelo, que tem por objetivo reproduzir a forma geométrica externa no molde de areia resinada do componente a ser fabricado, e a caixa de macho, que tem por objetivo reproduzir a forma geométrica externa do macho para que o metal líquido reproduza apenas a área vazia dentro do molde já fechado. Essa divisão tem por objetivo permitir a extração de um molde de macho para as caixas de macho e permitir que se obtenha o fechamento perfeito dos modelos com o macho no seu interior. Uma característica importante é que o modelo/caixa de macho deve considerar as

medidas dimensionais com a respectiva contração do material no estado líquido e depois no estado sólido. Os modelos e caixas de macho são confeccionados separadamente.

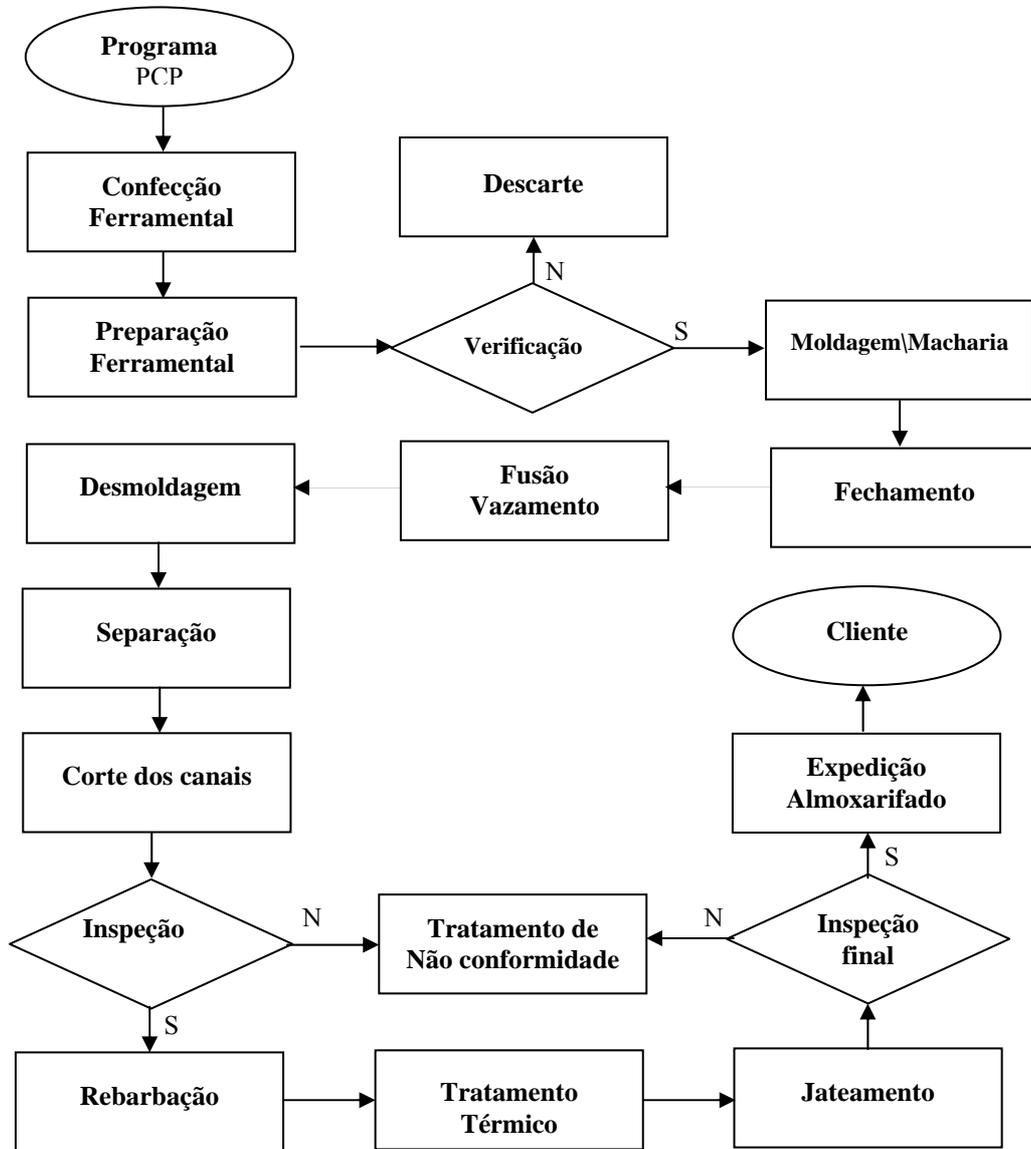


Figura 14 - Macro fluxo do processo de fundição de aço

O modelo/caixa de macho é confeccionado de forma praticamente artesanal, sendo que os profissionais que fabricam os mesmos são, normalmente, pessoas especializadas nesse tipo de tarefa.

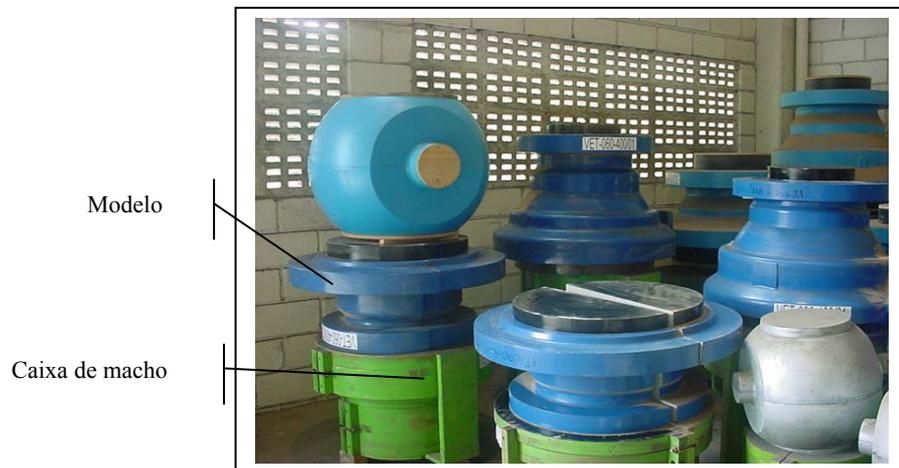


Figura 15 - Exemplos de modelos e caixas de machos

### ***3.2.3 Preparação do ferramental***

Esta fase visa definir os processos de fundição, em que são calculadas as dimensões dos canais de descida (local onde o metal líquido desce dentro do molde), os canais de ataque (local por onde o metal líquido entra para ocupar os espaços a serem preenchidos no molde) e outros detalhes que têm por objetivo evitar problemas e defeitos. Esta fase é de suma importância para que a qualidade do produto seja garantida.

### ***3.2.4 Moldagem/Macharia***

Esta fase tem por objetivo fazer a fabricação dos moldes: (superior e inferior) – lembrando que o modelo é dividido em duas partes – e também confeccionar o macho (parte oca da peça).

É realizado o enchimento do molde, momento em que se reproduz a geometria da peça, o que servirá como negativo para a sua reprodução. Como pode ser visto na figura 16, o modelo é disposto dentro de uma caixa que proporciona a capacidade de realizar o enchimento com areia resinada.



Figura 16 - Modelo em caixa

A figura 17 mostra o processo de enchimento da caixa com o respectivo modelo.



Figura 17 - Fabricação do molde

O enchimento mostrado na figura 17 é realizado com areia e resina, o que permite que o molde tenha a resistência mecânica necessária.

Com o destacamento do modelo tem-se a transferência da geometria do modelo para o molde, conforme mostrado na figura 18.



Figura 18 - Molde e modelo (momento do destacamento)

Após o destacamento e a cura a frio do molde, é realizada a sua pintura (figura 19) com tinta à base de zirconita. Essa tinta que estará em contato com o metal líquido tem como característica o ponto de fusão maior que o do metal, evitando assim problemas de sinterização.



Figura 19 - Pintura do molde

Neste ponto começa a fase de fechamento do molde. As partes inferiores e superiores do molde são coladas, o macho é colocado entre as mesmas, ficando assim uma parte vazia que será preenchida pelo metal líquido, conforme a figura 20.



Figura 20 - Molde e macho no momento do fechamento

Após a montagem, o molde é enviado para a fusão.

### 3.2.5 Fusão e Vazamento

Após a fusão do material (sucata) são feitas inspeções da composição química e adicionados elementos de ligas (C, Cr, Ni, Mo etc.) para corrigir a carga, de maneira a atender à especificação de normas. Após a constatação da conformidade da composição química com as normas aplicáveis, é realizado o vazamento no molde e o componente fundido propriamente dito é fabricado. As figuras 21 e 22 ilustram esta fase do processo.

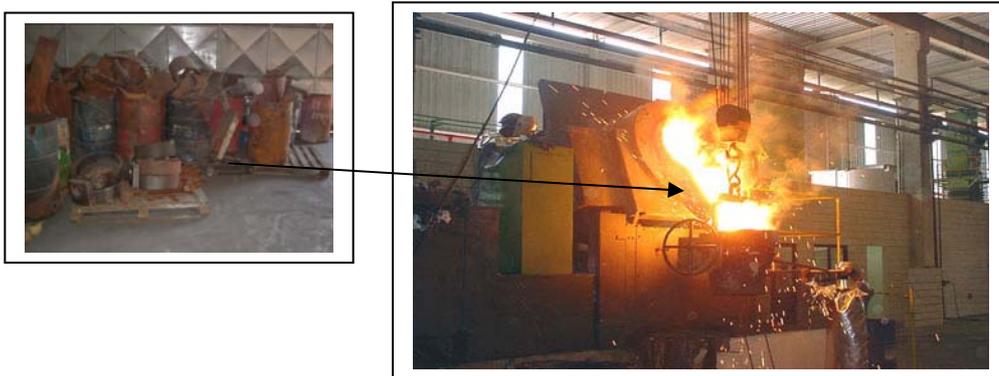


Figura 21 - Fusão material proveniente de sucata e ligas para atender às especificações



Figura 22 - Vazamento do metal líquido no molde

### 3.2.6 Desmoldagem

Após o resfriamento - que para peças maiores pode durar alguns dias -, a peça entra no processo de desmoldagem. Este processo consiste em quebrar o molde a fim de retirar o componente fundido, ainda no estado bruto (ver figura 23).



Figura 23 - Desmoldagem

Após a desmoldagem, começa o processo de recuperação mecânica da areia resinada.

### ***3.2.7 Acabamento***

Nesta fase do processo, os canais são cortados e são realizados acabamentos através de rebolos rotativos e de outras ferramentas que visam melhorar o aspecto visual, conforme normas de comparação através de fotos.

### ***3.2.8 Tratamento térmico***

Para que a estrutura do material fique conforme a sua especificação, os componentes têm que passar por um tratamento térmico. Este tratamento, que tem por objetivo melhorar a resistência mecânica e corrosiva dos materiais, é definido através de velocidade de aquecimento, tempo e temperatura do patamar e velocidade de resfriamento.

## **CAPÍTULO 4**

### **INSUMOS E RESÍDUOS DO PROCESSO E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS**

#### **4.1 Principais insumos da fundição**

No processo de moldagem são utilizados os seguintes materiais e insumos: areia-base, areia de cromita, resina fenólica, tinta a base de zirconita e gás natural. No processo de recuperação térmica: água (para o processo de resfriamento da recuperação). A seguir, analisam-se os consumos de cada um dos materiais e insumos, suas taxas de aproveitamento, os impactos ambientais gerados e os balanços de massas.

##### **a) Areia-base**

Conforme Fernandes (2004), a areia de fundição pode ser definida como um insumo, constituído de areia-base, aglomerante ou ligante químico e agente de cura, utilizado para a fabricação dos moldes

O objetivo principal da mistura da areia com a resina e os demais componentes é reproduzir as geometrias e dimensões do ferramental (modelo e caixa de macho), considerando suas respectivas contrações, e obter a resistência mecânica necessária para suportar os esforços do metal líquido no momento do vazamento e durante a solidificação da peça.

A areia-base e os demais componentes adicionados influenciam diretamente na qualidade final de uma areia de fundição e na qualidade da peça fundida. A areia possui características de refratariedade, variando com o tipo de areia-base. A areia é o componente com maior volume na mistura preparada, chegando a 98%, mas não tem a característica de aglutinação. Desse modo, é necessário fazer a adição de resinas para dar à mistura a resistência mecânica suficiente. Devido ao seu custo e às suas características, a areia-base mais utilizada nesse processo é a sílica, que deve possuir no mínimo 99% de SiO<sub>2</sub>.

Algumas características devem ser levadas em consideração para um processo controlado, tais como: impurezas, temperatura/umidade, potencial de hidrogênio (pH), forma do grão, granulometria, teor de finos etc.

## b) Tipos de areia-base

Segundo Fernandes (2004), a areia-base utilizada no processo de fundição é constituída de grãos de tamanhos entre 0,05 mm e 2 mm, que são peneirados para separação de acordo com seu tamanho. No Brasil essa areia-base é retirada principalmente de leitos de rios.

A areia-base pode ser encontrada contaminada com argilas e materiais alcalinos, que podem alterar suas características. São utilizados diversos tipos de areia, tais como: sílica, cromita, zirconita olivina e chamote. A escolha depende do processo de moldagem, da característica que se espera da areia e do tipo de material a ser fundido.

Seguem abaixo as principais considerações sobre areia de sílica que, além de ser a mais utilizada por questões de custos, é também o foco deste estudo.

## c) Areia-base sílica (Óxido de Silício - $\text{SiO}_2$ )

Neste tópico, ainda conforme Fernandes (2004), pontos importantes sobre a areia base de sílica são apresentados.

A preferência pela areia-base de sílica para utilização nos processos de moldagem é devida ao baixo custo e à facilidade de se encontrar este mineral e de extraí-lo da natureza, pois o mesmo é abundante na crosta terrestre. Muitas vezes o custo de transporte é muito maior que o custo da areia à base de sílica.

A característica da sílica é definida conforme a formação geológica e a jazida da qual é extraída. A formação da areia de sílica é proveniente da desagregação de rochas, principalmente pelo intemperismo. A constituição da rocha, o tipo de intemperismo sofrido e a extração definem características tais como: grau de pureza, constituição da areia etc. Os arenitos e quartzitos são as rochas que dão origem às areias silicosas, que se transformam sob certas condições com o passar dos tempos geológicos, originando os depósitos de areia ou as formações de quartzitos e sílex.

A jazida de onde provém a areia é determinante para a geometria dos grãos. Jazidas de rios apresentam, geralmente, grãos angulares, enquanto as areias de praia, submetidas a movimentos de grande amplitude, e as areias de desertos, expostas à ação dos ventos, possuem grãos mais arredondados.

Quimicamente, a sílica comporta-se como um ácido muito fraco, pH em torno de 6; sendo praticamente insolúvel em água, não sofre ataque de ácidos, exceto do fluorídrico e do fosfórico. Soluções alcalinas dissolvem a sílica, que reage com os carbonatos alcalinos e

alcalino-terrosos. Seu pH é influenciado pelo processo de beneficiamento. Normalmente é encontrada em cavas com pouca profundidade, abaixo da vegetação. A areia de sílica apresenta boas características para uso no processo de fundição e fabricação de vidros. O índice de areia retirada de uma cava pode chegar a 85%, sendo demais componentes constituídos de argila e impurezas. No entanto, as impurezas encontradas na areia de sílica não apresentam problemas no processo de fundição.

Quando da extração da sílica em uma jazida, vários subprodutos também são extraídos, tais como: areia-base para uso em fundição de várias granulometrias; areia para a indústria de vidro (grãos menores que 1 mm); farinha de areia ou pó de sílica, com módulos superiores a 325 AFS, para fabricação de abrasivos para indústria de cerâmica, tintas, pasta dental, cera de polimento etc.

A extração da areia das cavas ou minas é realizada através de escavações com equipamentos. Quanto maior a profundidade alcançada pelo equipamento na extração da areia de sílica, menor será a concentração de óxido de ferro nessa areia, logo maior pureza. Quanto maior a profundidade, menor a concentração de argila obtendo-se assim uma areia de coloração mais clara. Para retirada da argila, é realizado um processo de lavagem dessa areia com água e soda cáustica, o que provoca grandes impactos ambientais. O uso de soda cáustica na lavagem tem por objetivo auxiliar a separação das impurezas aderidas aos grãos, fazendo com que os mesmos flutuem na água utilizada para a lavagem.

O processo de tratamento da areia-base, depois da extração da mina, é iniciado com a retirada do material da cava por escavadeiras e o transporte por caminhões. É feito o peneiramento com uma malha de 1,4 a 1,8 milímetro, separando-se assim o material maior do que a malha da peneira, materiais orgânicos etc. O material peneirado é misturado à água e bombeado para os silos, para o processo de lavagem para a sua separação por atrito. Neste ponto ocorre a adição da soda cáustica à água para melhorar a eficácia da lavagem de areia. A argila separada é conduzida a uma lagoa para ocorrer a decantação e separação do líquido, que neste processo possui pH básico. É necessário um tratamento da água, que deve retornar ao rio de origem sem as impurezas oriundas do processo de beneficiamento da areia.

A separação/classificação do tamanho dos grãos é feita em classificadores hidrogravimétricos que funcionam com água e areia bombeada para um tanque. Os grãos maiores tendem a decantar no fundo do tanque, enquanto os grãos menores tendem a flutuar e saírem com a água. A mistura de água/areia que transborda do tanque é enviada para outro

tanque classificador para nova classificação pelo mesmo processo. No total são em torno de quatro classificadores.

A areia com água classificada é então enviada por bombeamento para um pátio onde será armazenada para secagem. Podem ainda ser utilizados secadores, que podem ter como fonte calorífica óleo BTE, gás ou lenha. No final do processo, a areia deve ter, no máximo, 0,2% de água. Depois, ela é armazenada em silos, onde fica estocada para a expedição.

Vale observar que durante a lavagem e secagem pode ocorrer modificação no pH da areia. Na lavagem, o uso de soda cáustica ou silicato de sódio faz com que o pH da superfície dos grãos fique altamente básico, sendo necessário um enxágue eficaz dessa areia, com água, para que o pH volte novamente próximo ao de uma areia-base nova. Durante a secagem, dependendo do material combustível que tenha sido utilizado, poderá ser liberado enxofre e, caso os teores estejam elevados, é possível que esse elemento se combine com a água que está presente na areia, formando um ácido, podendo provocar a acidez da superfície do grão de areia-base.

Pode-se encontrar a sílica sob as formas anidras (sem água), hidratada (silicatos) e coloidal (vidro). A sílica no estado anidro (sem água) na natureza pode ser encontrada em três formas, com a mesma composição química, mas com arranjo físico-cristalino diferente, sendo estes: quartzo (forma mais comum e de maior utilização em fundição, estável à temperatura ambiente e de densidade aproximadamente igual a 2,65); tridimita (forma estável à temperatura de 867°C) e cristobalita (forma estável à temperatura de 1.470° C).

O quartzo é a forma em que a sílica é utilizada, pois apresenta vantagens para uso em fundição, tais como: refratariedade (compatível com a maioria das ligas utilizáveis), baixo custo da matéria-prima e formas e estruturas que conferem ao fundido um bom acabamento superficial.

O aquecimento altera a estrutura do quartzo. À temperatura ambiente, ele pode apresentar a estrutura romboédrica denominada quartzo  $\alpha$  estável (quartzo baixo). Embora o aquecimento altere a sua estrutura, esta se mantém até a temperatura de 573°C. Caso o aquecimento continue e ultrapasse a 573°C, sua estrutura passa para a forma hexagonal chamada de quartzo  $\beta$  estável (quartzo alto). Esta estrutura hexagonal se mantém até a temperatura de 867°C. Se o aquecimento prosseguir e chegar a temperaturas superiores a 867°C, ocorrerá outra transformação estrutural, formando-se então uma nova estrutura chamada quartzo  $\beta$  metaestável (estrutura amorfa), que se mantém até a temperatura de 1.470° C.

Quando a estrutura quartzo  $\alpha$  estável se modifica para  $\beta$  estável (a partir de 573°C), ocorre aumento de volume nos grãos de areia de 0,8%, havendo uma dilatação de 0,3%. Se essa temperatura não se alterar muito e não atingir valores superiores a 867°C, quando a areia for resfriada, a expansão dos grãos será revertida, ocorrendo uma contração equivalente à dilatação sofrida com o aquecimento.

A transformação do quartzo de estrutura de  $\beta$  estável para  $\beta$  metaestável é irreversível. Nesse caso, a dilatação sofrida pelo grão se mantém, mesmo ocorrendo o resfriamento da areia até a temperatura ambiente. Assim, a nova estrutura não sofrerá mais dilatações se novamente aquecida, o que é uma grande vantagem para várias aplicações da sílica em fundição, pois previne efeitos relacionados à dilatação dos grãos de areia-base. A dilatação devido à transformação da estrutura de  $\alpha$  estável para  $\beta$  estável é uma grande causadora de defeitos em moldes.

Pelo fato de o ponto de fusão dos grãos de areia-base ocorrer entre 1.650 e 1.750° C, há necessidade do uso da tinta à base de zirconita, que possui um ponto de fusão maior, pois a temperatura de vazamento do metal líquido no molde ocorre na faixa de 1680° C.

A areia de sílica tem reações químicas com alguns metais de ligas de magnésio, o que não é bom para a fundição, mas não reage, por exemplo, com o ferro, a menos que este esteja oxidado. Esta oxidação, que deve ser evitada, geralmente tem origem na água presente no molde, que tem a função de inchar a bentonita, liberando hidrogênio (H) e oxigênio (O). O oxigênio livre no molde reage com a liga ferrosa quando o vazamento é realizado, formando camadas de óxidos no metal líquido a altas temperaturas. O óxido de ferro formado escorifica a sílica, formando um silicato de ferro de baixo ponto de fusão, o que facilita a penetração do metal líquido entre os grãos de areia provocando um acabamento superficial ruim do fundido.

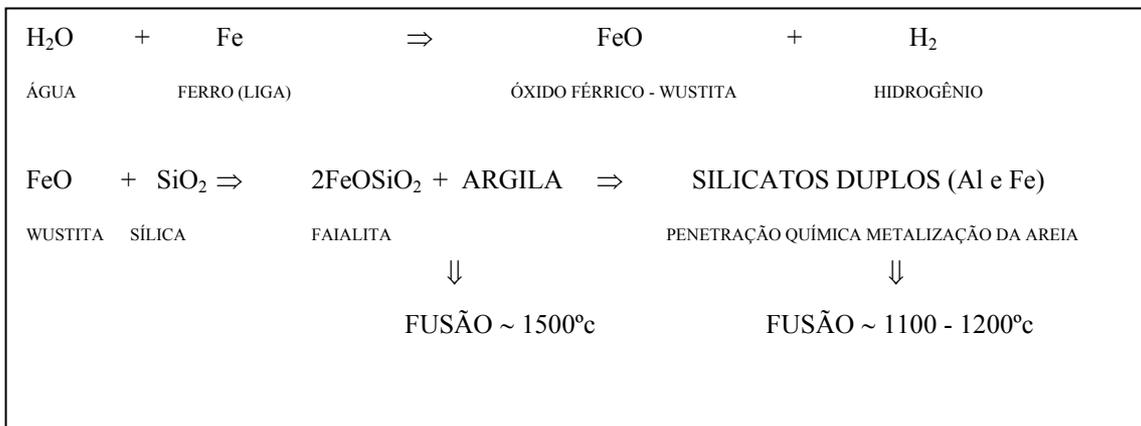


Figura 24 - Reação da areia a base de sílica durante vazamento  
 Fonte: Fernandes (2004).

A composição química da areia de sílica é dada na tabela 1

Tabela 1 - Composição química de areia de sílica

Fonte: Fernandes (2004).

SiO <sub>2</sub>	99,65%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,074%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11%
TiO <sub>2</sub>	0,037%
ZnO <sub>3</sub>	0,009%
CaO <sub>2</sub>	0,004%
MgO	0,004%
Na <sub>2</sub> O	0,002%
K <sub>2</sub> O	0,00%

Quadro 1 - Características gerais da sílica

Fonte: Fernandes (2004).

Densidade aparente:	1,70
Dilatação média até 1000°C:	1,50%
Temperatura de fusão:	1.750°C
Temperatura de sinterização:	1.350°C a 1.450°C

#### **d) Resina**

Segundo Scheunemann (2005), as primeiras resinas sintéticas foram produzidas pela em 1912. Por suas características e aplicações, se desenvolveram rapidamente, alcançando grande escala de utilização. Hoje ocorrem muitas pesquisas para desenvolver novas resinas para melhorar o processo de fundição e diminuir os impactos ambientais.

Segundo Peixoto (2003), existe no mercado uma gama considerável de elementos ligantes ou resinas orgânicas para a produção de moldes perdidos. Estas resinas devem prover à areia características que permitam realizar o processo de fundição sem a ocorrência de problemas. A maioria das resinas ligantes é composta principalmente de polímeros orgânicos, os quais são constituídos por moléculas complexas de alto peso molecular, formadas por reação, por um número de moléculas simples de mesmo tipo ou de tipos diferentes, sob

condições controladas de temperatura e pressão. Podem-se citar 3 principais categorias, conforme Peixoto (2003):

#### Resina fenólica uretânica

Segundo Sackheim e Lehman (2005), quando um grupo OH está ligado a um anel benzênico, a classe de composto chamada de fenóis. Mesmo sendo semelhantes aos álcoois, os fenóis são tratados como uma classe particular de compostos, pois são mais ácidos que os álcoois.

Conforme catálogo Rhodia (2008), os fenóis recebem outros nomes, tais como: benzenol, ácido carbólico, ácido fênico, hidroxibenzeno, entre outros. Possuem fórmula  $C_6H_5OH$  constituindo-se de uma massa cristalina incolor ou ligeiramente amarelo-róseo; é solúvel em água e em solventes orgânicos como éter, álcool e acetona. Possui características corrosivas e tóxicas, podendo causar irritações, queimaduras e ser até fatal, se inalado, ingerido ou entrar em contato com a pele. A inalação ou ingestão pode provocar danos aos rins, ao fígado e sistema nervoso. Já o contato com a pele pode provocar desde irritação até morte dos tecidos, dependendo basicamente do tempo desse contato e a concentração do fenol na substância. O fenol é usado na fabricação industrial de desinfetantes, resinas, polímeros, defensivos agrícolas etc.

Conforme Scheunemann (2005), as resinas fenólicas são obtidas através da reação de um fenol ou um fenol substituído, formando grupos metilol ( $-CH_2OH$ ) no anel fenólico em posições orto. Essas resinas têm como características: a rápida secagem, ótima resistência à água e muito boa resistência a: solventes fortes, agentes químicos, detergentes, ácidos, álcalis, abrasão, calor, umidade, além de uma dureza muito elevada. Desse modo, essa resina é indicada, e cada vez mais utilizada, nos processos de mistura com a areia de fundição para agregar a areia-base e prover a resistência mecânica necessária à confecção do molde de fundição. Um dos inconvenientes para a sua fabricação é a matéria-prima ser altamente tóxica.

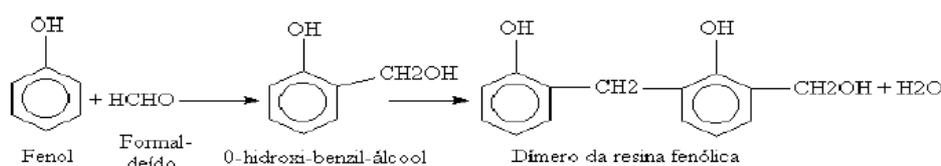


Figura 25 - Esquema reacional de polimerização da resina fenólica  
Fonte: Tintas e vernizes (2006).

A resina fenólica uretânica com catalisador líquido teve sua aplicação iniciada na década de 70 nos Estados Unidos, utilizando-se o processo de cura frio, ou caixa fria. Segundo Peixoto (2003), entre os problemas no uso do processo caixa fria (curado a temperatura ambiente) fenólico uretânico, está o forte odor dos catalisadores amínicos, assim como dos fumos dos processos de cura a quente, impregnando-se nas próprias roupas e persistindo após várias lavagens. A ventilação nas áreas de produção pode ser uma alternativa para reduzir esses odores de metilenodifenilisocianato (MDI) e trietilamina (TEA) ou dimetiletilamina (DMEA).

A resina possui como ingredientes ativos nas partes I e II uma resina fenólica – polioliol, contendo no mínimo dois grupos hidroxilas (-OH) – e um isocianato polifuncional com no mínimo 1 grupo isocianato por molécula, respectivamente. A parte I (resina fenólica) é límpida, âmbar, fonte de grupos hidroxilas, com uma vida de armazenagem de aproximadamente 6 meses a temperaturas entre 15 e 27 °C. A parte II (isocianato) constitui-se de um líquido marrom escuro formado por grupos isocianatos ativos na forma de polímeros do tipo M.D.I. (metilenodifenilisocianato), com uma ilimitada estabilidade de armazenamento em locais fechados. A escolha da parte II da resina depende das características químicas e da temperatura da areia, sistemas misturadores, tipos de areias, temperaturas ambientes e equipamentos.

As partes I e II são dissolvidas em solventes orgânicos para diminuir a viscosidade da resina, o que facilita o seu manuseio, bem como a mistura e a cobertura da areia.

A cura é baseada na reação de polimerização de adição entre os ligantes fenólico-isocianato catalisados, o que promove a formação de resina uretânica termofixa. Dentre os catalisadores, os mais utilizados são a trietilamina e a dimetiletilamina, que são inflamáveis, voláteis, alcalinos, corrosivos, com odor distinto, irritantes para a pele, os olhos e o sistema respiratório quando em alta concentração. Por essa razão, devem ser mantidas sistemáticas de manuseio e uso desses produtos, para garantir a segurança humana e ambiental.

Durante o processo de vazamento do metal líquido, a resistência mecânica requerida é muito alta, devido à temperatura, ao peso do metal e às forças exercidas pelos gases formados no interior do molde. A resina tem por objetivo justamente dar a resistência mecânica necessária para a confecção do molde e o seu manuseio. No processo de fundição aqui estudado, utiliza-se areia-base de sílica, juntamente com um composto de resina fenólica uretânica. Tal composto de resina está dividido em 3 partes, conforme boletim técnico do fabricante:

Parte 1 - Resina fenólica uretânica - Cura a frio

É uma resina fenólica utilizada no processo de cura a frio em conjunto com a parte 2 (poliisocianatos) e os catalisadores.

Quadro 2 - Característica resina fenólica uretânica - Parte 1  
(Conforme boletim técnico do fabricante da resina)

<b>Especificações -</b>	Teor de Não Voláteis	48% a 52%
	Formol Livre, %, máx	0,7
<b>Viscosidade -</b>	Copo Ford #4, (25 C), seg25 – 35	
<b>Peso Específico (25 C), g/cm<sup>3</sup></b>	1,060 - 1,080	
<b>Porcentagem de Uso -</b>	0,5 - 0,8% Parte 1 sobre o peso da areia Mesma quantidade da Parte 2 0,5 - 10% de Catalisador sobre o peso da Parte 1	
<b>Família Química -</b>	Polímeros	
<b>Fórmula Química -</b>	Polímeros Termofixo	
<b>Nome químico -</b>	Resina Fenol - Formaldeido	

Parte 2 - Descrição - Resina fenólica uretânica - Cura a frio

É uma resina de poli-isocianato em solução, utilizada no processo de cura a frio em conjunto com Parte 1 (Resina Fenólica) e o catalisador.

Quadro 3 - Característica resina fenólica uretânica - Parte 2  
(Conforme Boletim Técnico do fabricante da resina)

<b>Especificações -</b>	Teor de Não Voláteis	64 - 66%
<b>Viscosidade -</b>	Copo Ford #4, (25 C), seg10 – 14	
<b>Peso Específico - (25 C), g/cm<sup>3</sup></b>	1,075 - 1,085	
<b>Porcentagem de Uso -</b>	0,5 - 0,8% Parte 2 sobre o peso da areia Mesma quantidade da Parte 1 0,5 - 10% de Catalisador sobre o peso Parte 1	

## **4.2 Principais impactos ambientais**

Conforme os estudos realizados nesta pesquisa, os principais impactos ambientais do processo produtivo de uma fundição de aço decorrem dos seguintes resíduos, efluentes e emissões:

### **4.2.1 Resíduos sólidos**

Durante o processo de fundição, ocorre a geração de muitos resíduos sólidos. A seguir, estão descritos os principais resíduos sólidos gerados durante o processo de fundição de aço. O balanço de massa apresentado no decorrer deste trabalho não irá mostrar todos os resíduos devido ao foco do estudo ser apenas a resina fenólica uretânica.

#### **a) Areia com resina e tinta de zirconita**

Quase que a totalidade do volume de resíduos sólidos gerados em um processo de fundição é composta de areia com resina fenólica uretânica. Por essa razão, o objetivo principal deste trabalho é analisar o impacto ambiental desse resíduo. Assim, ao longo desta dissertação são descritos detalhes do resíduo de areia com resina e tinta de zirconita.

#### **b) Escória**

A escória é o subproduto gerado durante o processo de fundição. Pode ser considerada uma mistura de óxidos metálicos e impurezas do banho metálico. A geração da escória ocorre durante a transformação da sucata (no estado sólido) para o aço (no estado líquido). O aço submetido a temperaturas elevadas faz com que as impurezas sejam separadas do metal fundido e possam ser removidas.

Apesar de se constituir um resíduo sólido, a escória traz benefícios, pois permite a remoção das impurezas na fundição de metal e na minimização da reoxidação do produto final. É um resíduo que possui várias aplicações comerciais, podendo ser usada em cimento, lastro para linhas de ferro e para fertilizante.

Neste trabalho não foi realizado o levantamento da quantidade de escória gerada no processo de fundição, porque esse volume pode ser considerado insignificante, se comparado com os volumes de areia resinada, pelo seu impacto ambiental ser baixo e por essa escória ser utilizada em outras aplicações industriais.

#### c) Partículas sólidas em suspensão (pó)

Durante todo o processo de fundição, existem várias fontes de partículas sólidas. As principais fontes de geração são: o próprio processo de quebra do molde para retirada da peça fundida e a rebarbação, processo de corte e acabamento. Durante o processo de retirada dos componentes fundidos, a quebra do molde gera uma quantidade elevada de partículas sólidas, que se mantêm em suspensão. Essas partículas são constituídas de areia com resina. No processo de rebarbação, ou seja, o corte dos canais do processo de fundição, a remoção do material é feita por atrito, o que também gera partículas sólidas metálicas.

Não são avaliados, aqui, os impactos ambientais dessas partículas sólidas que ficam em suspensão na fábrica, nem é feita uma avaliação quantitativa do seu volume, pois essas análises não se enquadram nos objetivos desta pesquisa. Isso não quer dizer, no entanto, que tal não mereça atenção, pois gera impactos ambientais e problemas na área de saúde ocupacional. Por essa razão, é obrigatório o uso de EPI - equipamentos de proteção individual, tais como máscaras e óculos. Em fundições de grande porte e, conseqüentemente, com maior disponibilidade de recursos, sistemas de exaustão e filtragem são utilizados.

#### d) Materiais diversos

Durante todo o processo de fundição são gerados resíduos diversos, tais como: eletrodos (no setor de solda), estopas contaminadas, discos de corte/abrasivos (no setor de rebarbação), granalha de aço (no setor de acabamento), entre outros que são gerados em uma fábrica com ambiente altamente agressivo.

Não são avaliados os impactos ambientais em relação a esses diversos materiais e nem a análise quantitativa dos volumes desses resíduos, devido ao seu baixo impacto, já que as quantidades geradas não se mostram relevantes para o estudo em foco neste trabalho.

#### e) Sobras de materiais provenientes dos canais

No setor de corte são gerados volumes consideráveis de sucatas provenientes dos cortes de canais nos processos de fundição.

Os levantamentos realizados no processo produtivo e aqui apresentados no balanço de massa demonstram que, para 1 kg de peça fundida, é gerado aproximadamente 0,6 kg de resíduo de sucata de canais dos processos de fundição. Esta razão peso da peça acabada por peso do aço utilizado no processo de fundição é chamada de rendimento metálico. Sabe-se que, além do inconveniente do resíduo gerado, o baixo rendimento provoca outros impactos

ambientais e econômicos no processo produtivo. Quanto maior o volume utilizado no processo de fundição, maior será o consumo de energia, o tempo de fundição, o tempo de limpeza da peça, entre outros aspectos negativos.

Para que o rendimento metálico seja o mais próximo do ideal, são utilizados programas capazes de dimensionar os processos de fundição, simulando inclusive processo de vazamento, resfriamento e comportamento do aço nas fases intermediárias. Um dos inconvenientes do uso desses programas é o custo elevado para a sua aquisição, que pode chegar a US\$ 50.000,00, conforme levantamento de custo realizado durante este estudo. Outro inconveniente é a necessidade de manter a mão de obra especializada e com grande experiência em dimensionamento de processos de fundição, para os ajustes finais. Isso ocorre devido ao grande número de variáveis do processo, tais como: tipo de processo de moldagem, características da areia/resina, tipo de material a fundir etc.

Outro problema encontrado foi o limite de uso do retorno da sucata proveniente dos processos. O uso de uma quantidade maior de retorno de sucata dificulta a preparação do banho metálico (material a ser fundido), podendo provocar defeitos nos componentes fundidos. O limite para melhorar o rendimento é a qualidade dos produtos fundidos. Um processo de fundição incorreto pode provocar inúmeros problemas de qualidade, tais como, inclusão de escória, rechupe, enchimento incompletos, entre outros.

#### ***4.2.2 Efluentes líquidos***

Durante estudos realizados na fundição que foi objeto desta dissertação, verificou-se que poucos resíduos líquidos foram gerados no processo produtivo. Os principais são os óleos lubrificantes e os produtos utilizados na inspeção por líquido penetrante.

##### **a) Óleos lubrificantes**

Verificou-se que os óleos lubrificantes são utilizados apenas nas máquinas do processo de fundição e em pequenos volumes. Esses óleos são, depois, coletados e vendidos a empresas especializadas que os reprocessam e os comercializam para outros fins. Por esse motivo não foram realizados estudos quantitativos e de impactos ambientais para este resíduo.

##### **b) Materiais dos ensaios como líquido penetrante**

Foi verificado que o efluente líquido gerado em maior quantidade no processo de fundição são os produtos utilizados na inspeção por líquido penetrante. Para que haja garantia

de qualidade dos produtos fundidos, são realizadas inspeções por líquido penetrante em 100% dos componentes fundidos. Esse volume acaba provocando uma quantidade considerável de resíduos. Tais resíduos são coletados e retornados ao fabricante, que adiciona reagentes químicos para neutralizar os seus efeitos danosos ao meio ambiente, ou seja, trata o material para o descarte (conforme estudos realizados pelo próprio fabricante).

Não foram avaliados os impactos ambientais desses resíduos e nem feita a análise quantitativa de seus volumes, pois o foco deste trabalho está nos resíduos de areia resinada, fonte de maiores impactos ambientais.

#### **4.2.3 Emissões gasosas**

Verificou-se que durante várias fases do processo de fundição são gerados gases, provenientes de reações químicas diversas que neste estudo não foram avaliadas. Foram verificadas emissões gasosas no processo de desoxidação do banho metálico, no processo de vazamento e no processo de recuperação térmica da areia resinada.

Conforme Albertus (2004), as emissões de odores pelas fundições no processo de vazamento tornam-se um entrave à sua aceitação. Atualmente, existe a preocupação de desenvolver resinas que diminuem a emissão de gases durante a fase de vazamento do metal líquido. Solventes que substituem o éster metílico oferecem redução significativa de odores.

#### **4.3 Problemas ambientais da areia de fundição**

Após o estudo preliminar dos resíduos, efluentes e emissões, conforme apresentado no item anterior, ficou claro que a principal causa de impactos ambientais está na geração de um grande volume de resíduos sólidos de areia de fundição.

Em fundições como as que são objeto deste estudo, que possuem apenas o processo mecânico de recuperação, pode-se chegar a cerca de 80% de reutilização de areia, sendo necessário apenas o uso de areia nova nas áreas de contato direto com o metal líquido. Contudo em alguns processos de moldagem este índice de recuperação mecânica pode não ultrapassar 50%. Além de diminuir os custos do descarte, a recuperação reduz os impactos ambientais, pois a areia reutilizada impede o consumo de novo insumos, tais como a areia-base. Grandes investimentos são necessários para reutilização da areia contaminada de fundição, mas em médio e longo prazos esses investimentos são altamente rentáveis.

O transporte e o armazenamento dos resíduos da areia de fundição dependem basicamente da sua classificação, conforme a NBR 10.004, o que pode aumentar os custos de descarte significativamente caso o resíduo seja classificado como perigoso. Há uma tendência natural de utilização de recursos tecnológicos para recuperação da areia devido ao aumento dos custos e das dificuldades de descarte desses resíduos nos grandes centros industriais. Existem estudos de unidades móveis de tratamentos da areia utilizadas na fundição. O maior polo de fundição no Brasil encontra-se em Santa Catarina, onde estão algumas das maiores e mais bem estruturadas fundições do Brasil. Este é também um polo de pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias, dos aspectos de produção e ambiental.

#### **4.4 Classificação de resíduos sólidos**

Observa-se que, com o passar do tempo, as leis ambientais no Brasil – formuladas nas esferas federal, estadual e municipal – vêm se tornando cada vez mais protetoras e obrigando os setores da economia a se adaptarem para reduzir as agressões ao meio ambiente.

Apesar de considerar esses avanços, a concepção deste trabalho baseia-se no fato de que todo processo produtivo gera um produto intencional (o produto que se espera) e um não intencional (resíduos). Neste estudo, o produto intencional é o componente fundido e os não intencionais são os resíduos gerados no processo produtivo, sendo que aqui o resíduo em foco é areia de fundição.

Para o resíduo em estudo, as normas da ABNT aplicáveis são:

- a) NBR 10.004 - Resíduos Sólidos - Classificação;
- b) NBR 10.005 - Lixiviação de Resíduos – Procedimentos;
- c) NBR 10.006 - Solubilização de Resíduos Sólidos - Métodos de Ensaio.

Estas normas descrevem a metodologia de classificação dos resíduos sólidos (NBR 10.004), bem como os métodos de ensaios de lixiviação (NBR 10.005) e solubilização (NBR 10.006). O processo de classificação é descrito, de forma resumida, no fluxograma apresentado na própria NBR 10.004:2004 (Figura 1 da norma), conforme mostra a figura 26.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2004), a classificação do resíduo envolve a identificação do processo/atividade que o gerou, seus constituintes e suas características. Deve ser verificado se o resíduo consta nos anexos da referida norma de acordo com os impactos que causam à saúde e ao meio ambiente.

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 10.004 (2004) e Auad (2005), existem 3 classificações:

**Resíduos classe I: Perigosos** - aqueles que apresentam periculosidade, ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade.

**Resíduos classe IIA: Não perigosos / Não-inerte** - estes resíduos podem ter propriedades, tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

**Resíduos classe IIB: Não perigoso / Inerte** - são quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Seguindo o fluxograma da figura 26, caso o resíduo seja de origem conhecida e conste nos anexos A e B, será considerado classe I - Resíduo perigoso. Caso o resíduo seja de origem desconhecida ou não conste nos anexos A e B, deve ter suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade verificadas. Caso possua no mínimo uma dessas características, o mesmo é considerado classe I - Resíduo perigoso; em caso negativo, classe II - Resíduo não perigoso.

Para verificar se o resíduo é considerado classe IIA - Resíduo não perigoso - Não inerte ou classe IIB - Resíduo não perigoso - Inerte, deverá ser analisado se existem constituintes em concentrações superiores ao descrito no anexo G. Caso haja algum constituinte acima do máximo permitido, o resíduo é classe IIA - Resíduo não perigoso - Não inerte; em caso negativo, classe IIB - Resíduo não perigoso - inerte.

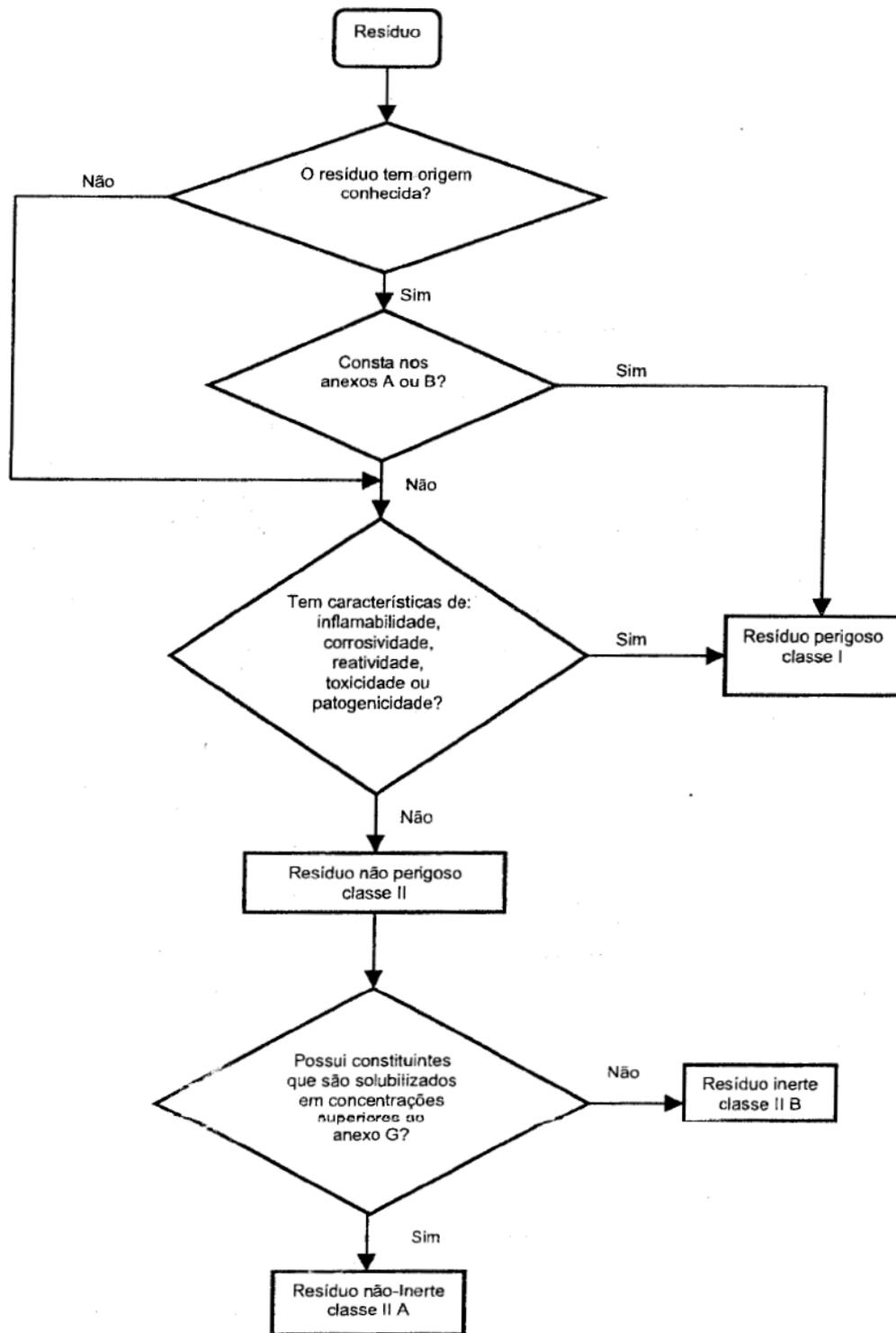


Figura 26 - Fluxograma - Caracterização e classificação de resíduos  
 Fonte: NBR 10.004:2004

#### 4.5 Classificação do resíduo de areia resinada

A areia resinada deve ter suas características analisadas para que se verifique a sua classificação quanto ao atendimento à sua disposição como resíduo sólido. Nesta pesquisa, foram realizados testes conforme a NBR 10.004:2004; testes de lixiviação, conforme NBR 10.005:2004 e de solubilização, conforme a NBR 10.006:2004.

Tabela 2 - Amostras para ensaio de classificação de resíduo

Amostras		1º	2º	3º
Local coleta		Após Recuperação mecânica	Após Recuperação térmica	Filtros Recuperação mecânica
Classificação		Classe IIA Não perigoso Não inerte	Classe IIA Não perigoso Não inerte	Classe IIA Não perigoso Não inerte
Ensaio	Solubilização	Alumínio 1,5 mg/l	Alumínio 0,6 mg/l	Alumínio 0,2 mg/l
		Fenóis Totais 0,03 mg/l	Fenóis Totais 0,04 mg/l	Fenóis Totais 4,2 mg/l
		Fluoreto 10,90 mg/l	Ferro 0,08 mg/l	Fluoreto 1,82 mg/l
	Lixiviação	Parâmetros conforme especificações		

Conforme descrito na tabela 2, foram preparadas inicialmente três amostras, retiradas de pontos estrategicamente escolhidos. Depois foi solicitada a análise dessas amostras conforme a NBR 10004:2004, NBR 10.005:2004 e a NBR 10.006:2004.

A primeira amostra foi retirada após o processo de recuperação mecânica, ou seja, sem recuperação térmica no calcinador. Esta amostra foi classificada como Classe IIA - Resíduo não perigoso, não inerte. A segunda amostra foi retirada após os processos de recuperação mecânica e térmica, ou seja, com recuperação térmica no calcinador. Esta amostra foi também classificada como IIA - Resíduo não perigoso, não inerte. A terceira amostra de areia constituiu-se de um material que seria descartado. Foi retirada após o processo de recuperação mecânica, depois que os finos foram retirados dos filtros, ou seja, sem recuperação térmica no calcinador. Esta amostra foi classificada como IIA - Resíduo não perigoso, não inerte.

Com base nessas amostras, toda a areia tratada, inclusive após o tratamento térmico, foi considerada um resíduo não perigoso, não inerte Classe IIA, conforme a NBR 10.004:2004. Esta classificação foi obtida a partir de uma análise que seguiu estritamente todos os parâmetros definidos na norma ABNT NBR 10.004. Para se classificar o resíduo

como classe I - Perigoso, é necessário que o resíduo esteja classificado nos anexos A e B da norma ABNT 10.004. Procedeu-se da seguinte maneira:

- ✓ Ao se verificar o resíduo no Anexo A - Resíduo perigoso de fontes não específicas: o fenol não foi encontrado, ou seja, não está classificado como sendo um constituinte perigoso. Mesmo porque o fenol é um resíduo de fonte conhecida.
- ✓ Ao se verificar o resíduo no Anexo B - Resíduo perigoso de fontes específicas: o fenol com a respectiva fonte geradora não foi encontrado, ou seja, não está classificado como sendo um constituinte perigoso.
- ✓ Ao se verificar o Anexo H - Codificação de alguns resíduos classificados como não perigoso: foi encontrado o resíduo de areia de fundição (A011), o que pré-classifica este resíduo como sendo da classe II.

A partir dessa verificação foi realizada a classificação do resíduo conforme classe II nas amostras da tabela 2.

O ensaio de lixiviação não mostrou nenhum parâmetro com o valor máximo permitido (VMP) ultrapassado. Já no ensaio de solubilização, foram encontrados os parâmetros de VMP conforme exposto na tabela 2.

A partir dessa verificação foi realizada a classificação do resíduo conforme classe II nas amostras da tabela 2.

O ensaio de lixiviação não mostrou nenhum parâmetro com o valor máximo permitido (VMP) ultrapassado. Já no ensaio de solubilização, foram encontrados os parâmetros de VMP conforme exposto na tabela 2.

Vale apontar algumas observações que puderam ser feitas a partir de um exame da norma Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2004). O fenol consta como sendo um constituinte perigoso (tóxico) no anexo B da norma NBR 10.004, mas aparece relacionado apenas a uma fonte geradora: a coqueificação (K087). O fenol está presente no resíduo conforme laudo do laboratório. Já em relação ao processo de fundição de aço, esse resíduo não está descrito. Desse modo, considerando apenas o que está estritamente expresso na norma, o resíduo não é diretamente classificado como classe I - Resíduo perigoso.

O fenol consta neste Anexo C (U188), o que confere a esta substância periculosidade. Assim, um resíduo com fenol pode apresentar risco à saúde pública, provocando mortalidade e doenças, além de risco ao meio ambiente, quando for gerenciado de forma inadequada.

O item 4.2.1.4 b) da NBR 10.004 expressa que se um resíduo possuir uma ou mais substâncias apresentadas no anexo e apresentar toxicidade, a natureza da toxicidade e a sua

concentração, entre outros aspectos, devem ser consideradas, mas não deixa claro como essas considerações seriam verificadas.

O item 4.2.1.4 d) da NBR 10.004 relaciona-se à toxicidade e aos resíduos que contenham as substâncias do anexo D e E, resultantes de derramamentos ou de produtos fora de especificação ou validade. O resíduo aqui estudado possui a substância tóxica fenol (U188) que aparece descrita no Anexo E.

Com base nas observações descritas acima, pode-se afirmar que a norma deixa dúvidas quanto à presença do fenol no resíduo aqui estudado, pois descreve essa substância como potencialmente perigosa para o meio ambiente e para a saúde pública, mas no Anexo H já pré-qualifica a areia de fundição como sendo um resíduo não perigoso.

Conforme Auad (2005), para confecção de machos e moldes, dependendo das características do processo de cada fundição em particular, existem resinas a base de fenol, substância que consta no Anexo C e que confere periculosidade ao resíduo. *“Entretanto, para avaliar esta periculosidade, foi efetuado teste DL50 para ratos atendendo solicitação da FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente”*, ou seja, a norma deixa dúvidas quanto à classificação do resíduo por citar a areia de fundição (A016) como um resíduo não perigoso no Anexo H, sem mesmo solicitar ensaios suplementares. Conforme mencionado acima, uma postura pró-ativa deveria ao menos exigir ensaios complementares para analisar se essa substância poderia causar problemas para a saúde e ao meio ambiente, e, em caso positivo, em que concentrações os danos ocorreriam.

#### **4.6 Estudo quantitativo da geração de areia resinada**

Conforme pode ser observado na tabela 3, o volume de areia utilizado no processo de fundição é grande; sendo no processo estudado em torno de 6,5 toneladas de areia para cada tonelada de produto acabado fundido. Com essa relação, tem-se um volume de 320 toneladas de areia em um processo de fundição de 50 toneladas de produto acabado, considerando uma empresa de pequeno porte. Em uma companhia de médio porte, utilizam-se 950 toneladas de areia para um processo de 150 toneladas de produto final. Já para uma empresa de grande porte, tem-se um consumo de areia de 3250 toneladas em um processo de fundição de 500 toneladas de componentes acabados, e são utilizadas 6400 toneladas de areia para um volume de 1000 toneladas de produto acabado. Como se pode constatar, os números apresentados representam um volume de areia muito grande.

Na tabela 4 são apresentados os volumes de descarte de areia no processo aqui estudado e é feita a comparação dos valores de descarte com e sem o processo de recuperação térmica.

Tabela 3 - Volumes gerados de areia resinada

<b>Porte</b>	<b>Capacidade/mês</b>	<b>Areia Utilizada</b>	<b>Resíduo Areia</b>
Pequeno	50 ton	320 ton	70 ton
Médio	150 ton	950 ton	212 ton
Grande	500 ton	3250 ton	700 ton
Grande	1000 ton	6400 ton	1400 ton

O volume de areia descartada no processo de fundição estudado é de aproximadamente 1,4 tonelada de areia resinada para cada tonelada de produto acabado fundido, sem o processo de calcinação, e aproximadamente 0,2 tonelada de areia resinada para cada tonelada de produto acabado fundido, com o processo de calcinação. Com essa relação, tem-se, para um processo de fundição de 50 toneladas de produto acabado, um volume de 70 toneladas de descarte de areia resinada, sem o processo de calcinação, e 10 toneladas de descarte de areia resinada, com o processo de calcinação. Para um processo de fundição de 150 toneladas de produtos acabado, um volume de 212 toneladas de descarte de areia resinada, sem o processo de calcinação, e de 31 toneladas de descarte de areia resinada, com o processo de calcinação. Para um processo de produção de 500 toneladas de produto acabado, um volume de 700 toneladas de descarte de areia resinada, sem o processo de calcinação, e de 100 toneladas de descarte de areia resinada, com o processo de calcinação. E para um processo de fundição de 1000 toneladas de produtos acabado, um volume de 1400 toneladas de descarte de areia resinada, sem o processo de calcinação, e de 200 toneladas de descarte de areia resinada, com o processo de calcinação.

Com processo de calcinação, a redução do volume de areia descartada, para um processo de fundição de 50 toneladas de produto acabado, é de 60 toneladas; para um processo de fundição de 150 toneladas de produto acabado, 181 toneladas; para um processo de fundição de 500 toneladas de produto, essa redução é de 600 toneladas e para um processo de fundição de 1000 toneladas de produto acabado, um volume de 1200 toneladas.

Tabela 4 - Volumes de areia calcinada resinada

<b>Porte</b>	<b>Capacidade</b>	<b>Resíduo de Areia Sem Calcinador</b>	<b>Resíduo de Areia Com Calcinador</b>	<b>Volume Reaproveitado</b>
Pequeno	50 ton	70 ton	10 ton	60 ton
Médio	150 ton	212 ton	31 ton	181 ton
Grande	500 ton	700 ton	100 ton	600 ton
Grande	1000 ton	1400 ton	200 ton	1200 ton

Como pode ser observado, com o processo de calcinação, consegue-se reduzir em sete vezes a geração de resíduo a ser descartado.

Salienta-se que os valores aqui apresentados referem-se a este processo em especial, e principalmente ao fato de tratar-se de uma fundição em início de funcionamento período em que a maior preocupação é desenvolver os processos garantindo a qualidade dos produtos. Com o decorrer do tempo, tende a haver uma melhoria significativa nesses valores.

#### **4.7 Custos envolvidos**

Para manter constante a qualidade do produto, conservar as características técnicas da areia de acordo com os parâmetros estabelecidos, assim como para manter o controle do processo, é necessário descartar regularmente uma quantidade de areia usada, equivalente à quantidade de areia nova a ser introduzida.

Os custos relacionados ao descarte e ao processo de recuperação térmica foram estudados, considerando estar o resíduo na classificação IIA.

Os cálculos dos custos aproximados foram realizados através do balanço de massa dos resíduos gerados (para maiores detalhes, ver os anexos) e do levantamento dos custos de descarte, de acordo com as cotações levantadas no mercado em empresas especializadas em São Paulo (sem considerar o custo de transporte, respectivas licenças etc.) durante o desenvolvimento deste estudo. Chegou-se aos resultados apresentados na tabela 5. Devido ao fato de a fundição em estudo estar localizada na Bahia, foi também realizado levantamento de custos no estado da Bahia, onde o valor cotado ficou acima da média de mercado paulista. Por esse motivo resolveu-se utilizar como parâmetros os valores praticados em São Paulo.

Foi constatado que, sem o calcinador, o custo mensal de descarte dos resíduos em uma fundição de pequeno porte (50 ton/mês) poderia chegar a um valor de R\$ 6.000,00 e que este valor que poderia ser reduzido para R\$ 800,00 se o processo de calcinação fosse agregado. Para uma fundição de médio porte (150 ton/mês), o custo mensal de descarte dos resíduos, sem o calcinador, poderia chegar a um valor de R\$ 18.000,00 e ser reduzido para R\$ 2.600,00

ao se agregar o processo de calcinação. Para uma fundição de grande porte (500 ton/mês), o custo mensal de descarte dos resíduos, sem o processo de calcinação, poderia chegar a um valor de R\$ 60.000,00 e haver uma redução para R\$ 9.000,00 com a agregação do calcinador.

Em todas as situações, o custo seria reduzido na ordem de 85% como uso do processo de calcinação em decorrência da redução dos volumes dos resíduos.

Tabela 5 - Custo mensal de descarte da areia resinada

Porte da empresa	Capacidade	Com calcinador		Sem calcinador	
		Resíduo Areia	Custo (R\$)	Resíduo Areia	Custo (R\$)
			Classe IIA		Classe IIA
Pequeno	50 ton	10 ton	900,00	70 ton	6.000,00
Médio	150 ton	31 ton	2.600,00	212 ton	18.000,00
Grande	500 ton	100 ton	9.000,00	700 ton	60.000,00
	1000 ton	200 ton	18.000,00	1400 ton	120.000,00

Caso a areia de fundição seja classificada como um resíduo perigoso Classe I (conforme NBR 10.004), o custo de descarte seria reduzido em 85%, proporcionalmente, devido a essa redução ocorrer no volume de resíduo a ser descartado. Não foram estudadas aqui as alterações de reclassificação após o tratamento térmico da areia (de classe I para IIA), pois os parâmetros atuais da norma permitem classificar o resíduo como classe IIA, ou seja, não existem na norma critérios de classificação como classe I e, conseqüentemente, não há parâmetros de comparação. Para descarte de resíduo classe I, os valores praticados podem ser considerados aproximadamente 300% do custo do descarte do resíduo classe IIA.

Os custos apresentados acima representam valores muito significativos tanto financeiramente quanto do ponto de vista ambiental.

Devido aos diferentes preços de venda dos diversos materiais comercializados no mercado de fundição, não é possível realizar uma comparação dos custos de descartes e do faturamento no âmbito deste trabalho. Uma comparação assim só seria possível de se realizar em casos específicos, pois depende de cada empresa e de seus produtos (materiais comercializados).

Segundo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2008), a produção nacional de 150.000 toneladas/mês de fundidos, no que se refere ao volume dos descartes, baseando-se nos dados coletados no processo de produção da empresa aqui estudada, haveria uma redução aproximada de 165.000 ton/mês. Do ponto de vista financeiro, isso representa

uma economia de aproximadamente R\$ 14 milhões/mês, para o resíduo classe IIA, levando em conta apenas o uso do processo de calcinação da areia.

A disposição da areia descartada em aterros gera um problema ambiental sério, principalmente devido às quantidades envolvidas. A implementação de leis ambientais mais restritivas nos últimos anos tem obrigado as fundições a destinarem seus excedentes de areia para aterros controlados, muitas vezes distantes mais de 100 km, aumentando consideravelmente os custos.

#### **4.8 Processo de recuperação**

O processo de recuperação de areia (cura frio) tem o objetivo básico de atingir um índice de recuperação tal que permita reduzir o descarte de areia a um valor próximo de zero. Desse modo, além de eliminar o custo de aquisição de areia nova, eliminam-se os custos de descarte de areia (que normalmente são maiores que o da aquisição de areia nova); e existe ainda a possibilidade de redução do consumo de resinas. A estes fatores deve-se acrescentar o benefício ambiental. A solução encontrada para se conseguir um descarte de areia próximo de zero está em fazer com que toda a areia proveniente da moldagem, do resíduo dos misturadores (caso haja este rejeito), do resíduo de moldes e de machos não vazados, passe por um recuperador mecânico. Nesse recuperador mecânico, a areia é destorroada, aspirada e peneirada.

A qualidade da recuperação depende de vários fatores, tais como as características da areia, a porcentagem de resinas utilizadas, os tipos das resinas utilizadas, relação areia-metal dos moldes, tipos de metal vazado etc.

Para se obter uma areia com um índice de perda ao fogo aceitável, e para esta ser utilizada como areia de faceamento há duas possibilidades:

- a) Adicionar areia nova ao sistema. Neste caso, porém, será necessário descartar igual quantidade de areia usada.
- b) Recuperar termicamente uma parte da areia já recuperada mecanicamente, de modo que esta areia possa voltar ao sistema com a mesma função da areia nova. Esse retorno ao sistema pode ser feito de duas maneiras: uma é misturar a areia recuperada termicamente com areia recuperada mecanicamente, em uma porcentagem tal que permita se obter uma mistura com índice de perda ao fogo em condições de garantir uma produção que não apresente problemas. A outra maneira é efetuar o faceamento do molde somente com areia recuperada

termicamente e efetuar o seu enchimento com a areia recuperada mecanicamente, ou seja, sem haver a mistura de areia.

A areia recuperada termicamente possui um índice de perda ao fogo muito baixo, além do fato de já ter sofrido modificações em sua estrutura, tornando-se mais estável e, conseqüentemente, com uma qualidade superior.

Quando os sistemas de recuperação mecânica e térmica são utilizados de forma combinada, o descarte de areia fica restrito à areia que permanece nas peças fundidas e que posteriormente é recolhida nos filtros das máquinas granalhadoras; à areia que fica retida na forma de finos nos filtros dos sistemas de recuperação mecânica e térmica e à areia que, permanecendo no chão da fábrica, é coletada e levada ao sistema de recuperação.

#### ***4.8.1 Tratamento mecânico***

Após o resfriamento do componente fundido, a primeira etapa é a quebra do molde para retirada da peça. Nesse momento, tem início o processo de recuperação mecânica. Dependendo do processo de fundição, além da quebra do molde e da agitação mecânica em um vibrador com grades para diminuição do tamanho dos pedaços partidos, é feito também o seu resfriamento em um trocador de calor.

Após a primeira etapa é realizado o transporte dos pedaços do molde para o recuperador mecânico. Nesse recuperador mecânico, ocorre a remoção da capa de resíduos aderidos aos grãos de areia-base, através de impactos e atrito entre os grãos. Na saída recuperação mecânica existem resíduos finos em partículas de areia com tamanho pequeno, que não permitem a sua utilização no processo novamente, e torrões, que são grãos ainda aderidos não quebrados durante o processo de moldagem.

Além do processo aqui descrito, há outros; sempre com a utilização de recursos de destorroamento, atritores pneumáticos e atritores mecânicos rotativos.

O transporte da areia, entre a quebra do molde e a recuperação mecânica, é feito por meio de ar comprimido dentro de tubulações, onde também ocorre a quebra dos torrões transportados. As perdas aqui estudadas durante o processo de recuperação mecânica encontram-se em torno de 3% entre torrões e finos, conforme levantamento realizado no processo produtivo.

Segundo dados da Associação Brasileira de Fundição - ABIFA (2006), *“Nesses tipos de atritores a aceleração imprimida aos grãos de areia é significativamente maior que a proporcionada pelos atritores pneumáticos, resultando, de um lado, maior remoção das*

*capas contaminantes por passagem em cada célula e, de outro lado, maiores perdas de grãos por fraturamento”.*

#### **4.8.2 Tratamento térmico**

Este processo, que utiliza o aquecimento da mistura de areia resinada para eliminar a resina aderida a essa areia (deixando-a assim novamente como areia-base) é justamente o foco deste estudo.

O equipamento normalmente utilizado, chamado calcinador, dispõe de um leito fluidizado, pois isso proporciona melhor distribuição da temperatura no interior da câmara, que opera entre 600°C e 700°C. Como combustível para o aquecimento, pode-se usar gás natural, aquecimento elétrico ou óleo combustível, sendo este, no caso aqui estudado, o gás natural.

Segundo Mariotto (2000) e a Associação Brasileira de Fundição - ABIFA (1999), na recuperação térmica, a areia é aquecida para que haja remoção dos elementos ligantes; este é considerado o processo mais eficiente para limpeza dos ligantes orgânicos, que se decompõem e volatilizam a temperaturas elevadas.

Esse processo tem como desvantagem a geração de gases que podem ser perigosos para o meio ambiente e para o ser humano. A análise dos gases emitidos não foi realizada neste estudo e conseqüentemente não se realizou o levantamento da periculosidade dessas emissões. Mas o levantamento de custos de uma análise de emissões gasosas foi realizado e se chegou a uma estimativa de R\$ 80.000,00, incluindo estudo de dispersão dos gases.

Os elementos contidos nos gases têm uma relação direta com a composição da resina e devido ao fato de a composição da resina ser um *know how* do fabricante a mesma não foi divulgada nem parcialmente para efeitos deste estudo.

De acordo com Scheunemann (2005), “*o tratamento térmico através de fornos de leito fluidizado está baseado na suspensão de um agregado por um fluxo de ar até que este assumam algumas das características de um fluido*”. A areia suspensa pelo fluxo do ar tem a resina calcinada em alta temperatura, sem que a areia seja destruída ou mesmo tenha suas características alteradas. Após a calcinação existe um sistema de resfriamento da areia, para que a mesma seja transportada ao silo de armazenamento. Segundo Scheunemann (2005), o processo de calcinação tem o início por meio da alimentação do leito pré-aquecido do reator com a areia, local onde ela é seca pelos gases gerados pelo próprio aquecimento. Durante a calcinação são gerados resíduos sólidos, tais como, finos e grãos perdidos durante o processo.

Conforme AFS Plant Engineering Committee (1982), a alta eficiência e qualidade da areia regenerada por calcinação constituem os pontos fortes desse processo. Devido ao custo relativamente baixo de operação do equipamento e à redução dos custos de descarte da areia resinada – pois o volume de resíduo quando a calcinação é feita é considerado insignificante se comparado com o volume de resíduos sem o processo de calcinação (conforme pode ser observado no decorrer deste estudo) – tem havido uma tendência ao uso dessa forma de tratamento atualmente.

Conforme Associação Brasileira de Fundição - ABIFA (1999), esse processo apresenta um rendimento final de regeneração próximo a 100%.

## **4.9 Processos alternativos**

### ***4.9.1 Alternativa do reuso da areia de fundição***

Atualmente, cada vez mais, as empresas estão sendo forçadas a estudar alternativas de uso da areia resinada, seja por força da lei, seja devido aos altos custos do descarte do resíduo. Este fato tem incentivado a pesquisa na busca de alternativas de uso da areia ou mesmo a sua reciclagem. Além dos processos aqui estudados, existem alternativas de uso de areia resinada. Um caso de uso alternativo é a fabricação de tijolos em Limeira, desenvolvida através de parceria entre a empresa Vargas, atual TRW (fundição) e a Centro Superior de Educação Tecnológica (Ceset) da Unicamp, em 1996. Todos os testes foram realizados e considerados satisfatórios. Rossini (2003), citado em Santos (2003), lembra que “*Naquele momento, pouco se falava no assunto*”, confirmando que esta preocupação sobre o resíduo é muito recente. E este foi um dos trabalhos iniciais.

Sobre as pesquisas realizadas, há mais uma avaliação positiva no estudo do uso da areia resinada como ingrediente de asfalto tipo CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente. Bonet (2002) observa que “*pode-se destacar que o dimensionamento de um traço asfáltico tipo CBUQ, pelo método Marshall, mostrou-se plenamente adequado*”, confirmando assim a viabilidade de outros projetos de estudo no sentido de se usar essa solução.

#### **4.9.2 Processos de regeneração alternativos**

##### **a) Tratamento úmido**

Segundo Scheunemann (2005), o sistema de tratamento úmido pode ser considerado um importante método de recuperação de areia de fundição através das operações unitárias de elutriação, decantação, secagem e resfriamento, sendo uma alternativa para a regeneração desse resíduo, principalmente de “areia ligada quimicamente inorgânica” (areias ligadas com silicato de sódio) ou de “areia ligada quimicamente via sistema misto” (fenólico alcalino).

Uma grande vantagem deste processo é a eficácia da remoção das capas dos resíduos, pois a substância ligante é solúvel em água. Por outro lado, é um processo que requer grande quantidade de água, um bem cada vez mais escasso e que, por ser imprescindível para a vida, deve ser utilizado para funções mais nobres. Outra desvantagem é a necessidade de secagem da areia após o fim do processo, sendo necessário o consumo de mais recursos ambientais.

##### **b) Tratamento químico**

O tratamento químico da areia de fundição é obtido através da oxidação química, o que é conhecido como processo Fenton.

Segundo Scheunemann, (2005) *“a oxidação química é um processo que demonstra grande potencial no tratamento de efluentes contendo compostos tóxicos não biodegradáveis. Através de reações químicas de oxidação podem-se degradar componentes orgânicos tóxicos”*. Esta alternativa é considerada mais eficaz, pois a resina é totalmente destruída, uma vez que no processo de calcinação a resina é transformada em emissões gasosas. Conforme Guedes (1998), os processos oxidativos convencionais utilizam como agentes oxidantes o oxigênio, ozônio, cloro, hipoclorito de sódio, dióxido de cloro, permanganato de potássio e peróxido de hidrogênio. Para alguns compostos, entretanto, a oxidação química convencional não é possível. Nesses casos, utilizam-se processos de oxidação avançados tais como o processo Fenton e Foto-Fenton.

#### **4.9.3 Processos de moldagem alternativos**

##### **a) Sistemas curados a frio - Cura a frio/Nobake**

Nos sistemas de cura a frio, utilizados desde a década de 60, as resinas ligantes são combinadas com catalisadores líquidos à temperatura ambiente.

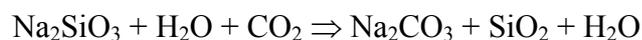
b) Sistemas curados por aquecimento - Caixa quente/Hot box

Nos sistemas curados por aquecimento, as resinas são misturadas com areia e catalisador, soprados na caixa/modelo e aquecidos a temperaturas próximas a 200 °C, o que cura a mistura em segundos. O molde produzido tem uma reação exotérmica, a qual é prolongada através do calor residual após a remoção do molde.

c) Sistemas curados por gasagem - Caixa fria/Cold box

Nos sistemas curados por gasagem, as resinas são misturadas com areia-base e sopradas na caixa/modelo; um catalisador gasoso é vazado através da mistura, efetivando a cura em poucos segundos à temperatura ambiente através da injeção de CO<sub>2</sub> ao final do processo de moldagem. Este processo tem um melhor controle dimensional, se comparado com os outros processos, e endurecimento rápido (alta resistência), sem a necessidade de estufas e tempo de cura.

A equação a seguir representa a reação de silicato de sódio com água dióxido de carbono.



As desvantagens deste processo é o custo do CO<sub>2</sub> e a areia não ser recondicionável (pode ser empregada apenas no faceamento da peça). Por esses motivos, este processo não é recomendado do ponto de vista ambiental e financeiro.

#### ***4.9.4 Tipos de moldes alternativos***

Segundo Peixoto (2003), existem basicamente dois tipos de moldes: molde permanente ou semipermanente e moldes perdidos. Estes dois tipos de moldes serão apresentados a seguir.

a) Moldes perdidos

Conforme Peixoto (2003), nos moldes perdidos são utilizados vários tipos de ligantes, que são agrupados em: areia ligada com argila, areia verde e areia ligada quimicamente. Descrevemos agora os principais processos de moldagem com moldes perdidos utilizados em fundições de aço.

b) Moldagem em casca (*shell molding*)

No processo mais conhecido como *shell molding*, ocorre a mistura de areia com resina sintética polimérica, a quente (termofixa). A secagem é realizada em estufa: 150 a 350°C. Essa moldagem possui um acabamento excelente, alta rigidez, boa precisão dimensional. Como a espessura da casca é pequena, pode se empregar uma areia bem fina sem prejuízo na permeabilidade do molde.

O fechamento das duas partes do molde e machos ocorre através de grampos ou por meio da colagem das partes para realizar o vazamento do metal líquido.

Entre as principais desvantagens desse tipo de moldagem estão: o custo elevado do modelo (precisão dimensional e resistência térmica), a areia não ser recondicionável e as limitações de tamanho (só pode ser realizado para peças menores que 15 – 20 kg). Um exemplo de sua aplicação é a fabricação das peças de motor de explosão refrigerado a ar, virabrequins e peças de responsabilidade (que justificam o custo do processo). Por esses motivos, esta não é considerada uma alternativa para o processo aqui estudado.

c) Processo em cera perdida (*investment casting*)

O processo de cera perdida, também conhecido como microfundido, recomendado para peças de tamanhos e pesos pequenos.

Este processo utiliza modelos de precisão (alumínio, cera ou termoplástico), com revestimento com lama refratária: gesso, pó de sílica, pó de zircônio. Consiste no endurecimento do revestimento e não do molde, como ocorre nos processos apresentados anteriormente. Durante a fusão, a reprodução da peça em cera, que se encontra dentro do revestimento resistente à temperatura, é queimada e a cera é perdida.

Este tipo de processo é muito utilizado e recomendado para produção em série de peças pequenas, daquelas em que há necessidade de um acabamento muito superior que os da fundição em areia e de peças complexas e com exigência de precisão dimensional. As suas desvantagens são: o custo do molde metálico para a confecção do modelo (de precisão), o custo da lama refratária (também elevado), exigência de muita mão de obra na montagem dos cachos, no revestimento e na secagem e o baixo rendimento entre peso das peças/peso do canal de alimentação.

#### d) Moldes semipermanentes

Estes moldes são utilizados mais de uma vez. Os materiais podem ser grafite ou cerâmica refratária. Neste processo, deve-se levar em consideração o tipo de metal, o tamanho, o peso e o formato da peça, o volume de produção, as tolerâncias dimensionais, o acabamento superficial, as propriedades mecânicas ou físicas, além dos custos do equipamento, dos insumos, do preparo dos moldes e dos métodos de limpeza das peças, da usinagem das peças e dos tratamentos superficiais.

Considerando uma produção de peças de pequenas, médias e grandes dimensões, ao se comparar os processos alternativos aqui descritos ao processo convencional de resina fenólica uretânica (que utiliza a areia-base de sílica e que é foco deste estudo), não foram observadas alternativas vantajosas do ponto de vista ambiental. Outro ponto a ser observado é que os processos alternativos apresentados não são recomendados para a fabricação de peças de forma não seriada ou para a produção de pequenas quantidades. O processo aqui estudado não permite o uso de caixas metálicas (com maior resistência mecânica) e conseqüentemente menor quantidade de areia.

Uma alternativa já usada no processo estudado é a utilização de travas e tirantes fabricados em aço carbono (comum na indústria mecânica) para aumentar a resistência mecânica do molde e reduzir o consumo de areia e resina. Com a utilização desse recurso, ocorre uma redução muito significativa do tamanho do molde e conseqüentemente do volume de areia resinada durante o processo. Esse recurso é muito vantajoso devido aos resultados positivos que se obtêm e ao seu baixo custo, pois ele depende de materiais que custam pouco e que podem ser utilizados inúmeras vezes.

#### ***4.9.5 Tipos de aglomerantes químicos alternativos***

##### a) Areia verde

Este processo é tem sido um dos mais utilizados em fundição durante décadas, por ser o mais econômico, rápido e convencional, além de sua utilização ser possível para a grande maioria dos tipos de metais (ferrosos e não ferrosos), segundo Peixoto (2003). Atualmente, entretanto, vem sendo substituídos por outros descritos neste estudo.

Neste processo são utilizados materiais tais como: areia de moldagem (mistura plástica), areias (natural, semissintética, sintética), argila e água. Além disso, não há a necessidade de aguardar a secagem do molde. O agente aglomerante principal é a argila

umedecida, que contém, no entanto, parte considerável de materiais orgânicos decorrentes do emprego de aditivos – tais como: pó de carvão, amido – e/ou da incorporação de machos reutilizados.

Conforme Castro (2008), do ponto de vista ambiental, esse processo tem um baixo impacto ambiental e para a saúde, mas acarreta uma grande quantidade de descarte. Por isso não traz vantagens e gera custos, devido ao grande volume de resíduo sólido a ser descartado. Já do ponto de vista do processo propriamente dito, ele possui baixa resistência mecânica, dificuldade de manuseio e controle da areia verde; conseqüentemente, baixa produtividade. Não é recomendado para peças de grandes volumes e para o aço, objeto deste estudo.

#### b) Silicato de sódio

De acordo com Castro (2008), esta resina teve seu uso iniciado na década de 50, fazendo parte de um dos processos mais antigos. Tem como mecanismo de cura a mistura de areia com CO<sub>2</sub> e ar à temperatura entre 100°C e 130°C. É utilizada também a mistura de 2 a 4% de silicato de sódio. É usado para a produção de peças pouco complexas e com pouca exigência de precisão dimensional. Possui baixo impacto ambiental se comparado com os sistemas orgânicos, mas gera grande volume de resíduos, pois não permite a reutilização da areia.

Do ponto de vista financeiro, tem baixo custo em relação à resina, mas alto custo em relação ao CO<sub>2</sub>. Quanto ao processo em si, ele possui várias desvantagens: sua produtividade é baixa, é higroscópico e o nível de controle é baixo, além disso, as características físicas da areia são ruins.

#### c) Shell

Conforme Castro (2008), este processo surgiu na Alemanha na década de 40 e possui características muito especiais tanto do ponto de vista de sua aplicação quanto no que se refere ao processo em si mesmo. Sua aplicação é para peças pequenas (até 20 kg) e que exijam certa precisão dimensional. Além disso, para que ele se realize é necessário também fazer investimentos em ferramental metálico, sendo recomendado para peças seriadas.

Neste processo, utiliza-se resina de fenol com areia e aporte de calor com temperatura entre 260 °C e 290 °C; é formada uma “casca” (por essa razão o nome *shell*) por meio de um modelo metálico ou de uma matriz. Tem como desvantagens: o consumo de gás, a necessidade do controle adicional para o uso do molde e o fato de ser um processo com alto

custo. Para a questão ambiental é um processo interessante, pois utiliza e descarta uma quantidade baixa de areia. Só necessita de 30 a 50% da areia usada no processo convencional e o seu descarte é próximo de zero, pois se faz a recuperação térmica – sendo esta a única alternativa possível neste caso.

#### d) Alquídicas

Conforme Castro (2008), este processo utiliza como resina o óleo vegetal polimerizado, o isocionato e um catalisador que promove uma reação entre ácidos orgânicos e compostos metálicos. Possui um mecanismo de cura frio sob a ação do catalisador, que reage com a resina e o oxigênio. Esta resina é recomendada para ligas de aço, possuindo boas características mecânicas do molde. Como desvantagem, o processo possui baixa produtividade e necessita de controle, e a resina tende à corrosão.

#### e) Fenólica ureica

Ainda conforme Castro (2008), este processo se iniciou na década de 50 e utiliza uma resina combinada com ureia-formol, fenol-formol ou álcool furfurílico e com um catalisador de ácido fraco. Utiliza-se caixa quente para cura através de pré-aquecimento de 200 °C. Apesar de permitir alta produtividade e bom acabamento superficial da peça fundida, é necessário estocagem em câmara fria e aquecimento na caixa utilizada.

Em relação ao aspecto ambiental, provoca grande formação fumos do formol e não permite recuperação da areia, gerando assim grandes quantidades de resíduo.

#### f) Fenólica alcalina

A resina alcalina pode ser curada através de dois processos: a cura por éster e a cura por CO<sub>2</sub>, (processo patenteado por um fabricante como resina ecológica).

O processo de cura de resina alcalina por éster teve seu início na década de 80 na Inglaterra. O mecanismo de cura consiste em se diluir o éster, em uma solução altamente básica (pH 13 ou 14), o que resulta na formação de álcool e sal de metal alcalino com redução do pH.

Este processo tem um custo baixo, mas possui característica higroscópica, apesar de possibilitar um acabamento superficial muito bom das peças. Do ponto de vista ambiental, permite baixo nível de reutilização da areia recuperada mecanicamente, em torno de 50% de reutilização da areia.

A cura de resina alcalina por meio de gasagem com CO<sub>2</sub> é um processo cujo agente ligante é altamente estável. O CO<sub>2</sub> provoca a redução do pH, ativando o reagente através de uma reação cruzada e provocando a cura imediatamente. Permite um acabamento superficial muito bom, mas é um processo que exige controle apurado.

Do ponto de vista ambiental, possibilita baixo nível de reutilização da areia recuperada mecanicamente, mas utiliza um catalisador considerado ecológico.

#### g) Furânica

De acordo com Castro (2008), a utilização dessa resina foi iniciada na década de 60 na Inglaterra. Há duas opções com essa resina: a furânica ureica e a furânica fenólica. O catalisador utilizado é um ácido forte, sendo os mais comuns, o ácido paratolueno sulfônico e o ácido xileno sulfônico. A velocidade da cura é variável. A cura dessa resina é realizada a frio (cura frio) por meio de uma reação de condensação que libera água.

Esta resina tem uma velocidade de cura lenta – sendo, portanto, recomendada para peças grandes – possibilita excelente precisão dimensional e permite seu uso em baixas temperaturas. Como desvantagem, o processo necessita de controle de adições em aço, existindo ainda o perigo de contaminação, no caso de ferro fundido nodular.

Do ponto de vista ambiental, permite fácil recuperação da areia.

#### h) Fenólica uretânica com catalisador por gás

Conforme Castro (2008), a resina fenólica uretânica, que é o objeto deste estudo, é catalisada através de um catalisador líquido, conforme descrito nesta dissertação.

Apresentada aqui entre os demais processos alternativos de ligantes químicos, a resina fenólica uretânica catalisada por gás foi aplicada pela primeira vez na década de 70 nos Estados Unidos. Nesse processo, aplica-se também a parte 1 e a parte 2 da resina, mas seu catalisador é um gás de amina. A polimerização da parte 1 e parte 2 ocorre em uma reação instantânea.

Existem vários tipos de solventes para as resinas fenólicas uretânicas. Os mais utilizados são os aromáticos, que têm um baixo custo, mas geram fumaça. Os chamados solventes ecológicos, à base de óleo vegetal e gordura animal esterificadas, não são inflamáveis, mas precisam de algum tempo para desmoldagem, o que diminui a produtividade da produção. Já os solventes inorgânicos são produto de alta tecnologia, pois geram pouca fumaça e possuem menos odor entre os demais.

Existem outros tipos de ligantes químicos pouco comuns na indústria de fundição. A escolha da melhor opção do ligante químico a ser utilizado no processo de fundição depende de vários fatores, tais como: as características do processo de produção (equipamentos disponíveis, tempo de cura, produtividade, volume, produção serial ou por encomenda etc.), características do produto (acabamento, tamanho, peso, geometria etc.) e custo (descarte da areia, matéria-prima etc.).

#### **4.10 Equipamentos e processos**

Na empresa escolhida para esta pesquisa, o processo de fundição dispõe de um equipamento que tem capacidade de calcinar 1,5 toneladas/hora, ou seja, tem capacidade de realizar a calcinação necessária para atender ao processo de fundição aproximadamente 800 toneladas (peças acabadas), conforme dados coletados na própria empresa. A temperatura de trabalho do calcinador fica em torno de 600 a 700°C, sendo que a temperatura máxima do equipamento não deve ultrapassar 950°C.

##### **a) Sistema de recuperação mecânica**

Conforme o IMF (2004) do fabricante do equipamento do recuperador, após a quebra do molde no equipamento vibratório (*shack out*) e da passagem da areia no resfriador, os torrões de areia resinada vão para o sistema de recuperação mecânica através de tubulações.

O sistema de recuperação mecânica é mostrado na figura 27. A limpeza de grão começa na primeira câmara, através de atrito de dispositivos pneumáticos (ver figura 28, item 1). O pó da resina é removido nessa primeira fase e é sugado para o filtro por meio da ação de um vácuo gerado por uma bomba (ver figura 28, item 2).

A areia é então classificada (quanto ao tamanho dos grãos) em uma tela vibratória (ver figura 28, item 3). Os grãos maiores retidos nessa tela vibratória são automaticamente retirados por gravidade e armazenados em um container. Logo após a tela vibratória, existe uma segunda tela de segurança (ver figura 28, item 4), que impede que as partículas selecionadas na primeira tela caiam no refrigerador se ocorrer a ruptura da tela vibratória.

Um dispositivo controla o nível da areia (ver figura 28, item 5), assegurando que o refrigerador da areia abaixo dele esteja mantido no nível correto.

A areia é resfriada através dos trocadores de calor (ver figura 28, item 6), através de troca térmica em água. É instalada também uma torre de resfriamento de água no lado externo da fábrica.

Uma ponta de prova termostática situada acima da grade da descarga do refrigerador (ver figura 28, item 7) assegura a descarga da areia na temperatura requerida. Um sistema de abertura (ver figura 28, item 8) permite a descarga da areia, mantendo assim a eficiência do *cooler*.

#### b) Sistema de recuperação térmica

Conforme IMF (2004) do fabricante do equipamento do calcinador, após a recuperação mecânica, as partículas de areia foram somente quebradas e separadas em tamanhos ideais para voltar ao processo de fundição de modo que ainda contêm resina. Para que ocorra a remoção dessa resina, essa areia entra no sistema de recuperação térmica através do equipamento que possui o leito fluidizado. Esse leito fluidizado (ver figura 29, item 1) é constituído de ar e gás natural injetados, em uma mistura ideal para se conseguir uma combustão que mantenha a temperatura entre 600 e 700° C. Durante a queima, os componentes orgânicos eliminados da resina completam a combustão na parte superior da câmara de combustão. Os gases são retidos por um tempo para se conseguir destruir todos os elementos.

Segundo dados do fabricante, o tempo de permanência dos gases é suficiente para destruição total da resina. Durante o estudo aqui apresentado, não foi possível verificar esses resultados através da realização do ensaio de queima, pois os recursos necessários não foram colocados à disposição em tempo hábil.

Após a calcinação propriamente dita, a areia já calcinada entra na câmara de resfriamento (ver figura 29, item 2), onde um trocador de calor vai resfriá-la. A água da serpentina dissipa o calor da areia, possibilitando o seu uso imediato.

A extração dos gases e das partículas sólidas em suspensão (no interior da câmara) é realizada através da condução dos gases a um trocador de calor e posteriormente a filtros (ver figura 29, item 3) do tipo manga. Os gases e as partículas sólidas chegam aos filtros já na temperatura correta para evitar danos aos mesmos.

A temperatura, a mistura de ar e gás natural e outras condições para a eficiência do sistema são controladas por uma central própria para essa finalidade, o que permite o controle sistemático e em tempo real de todo o processo de recuperação térmica.

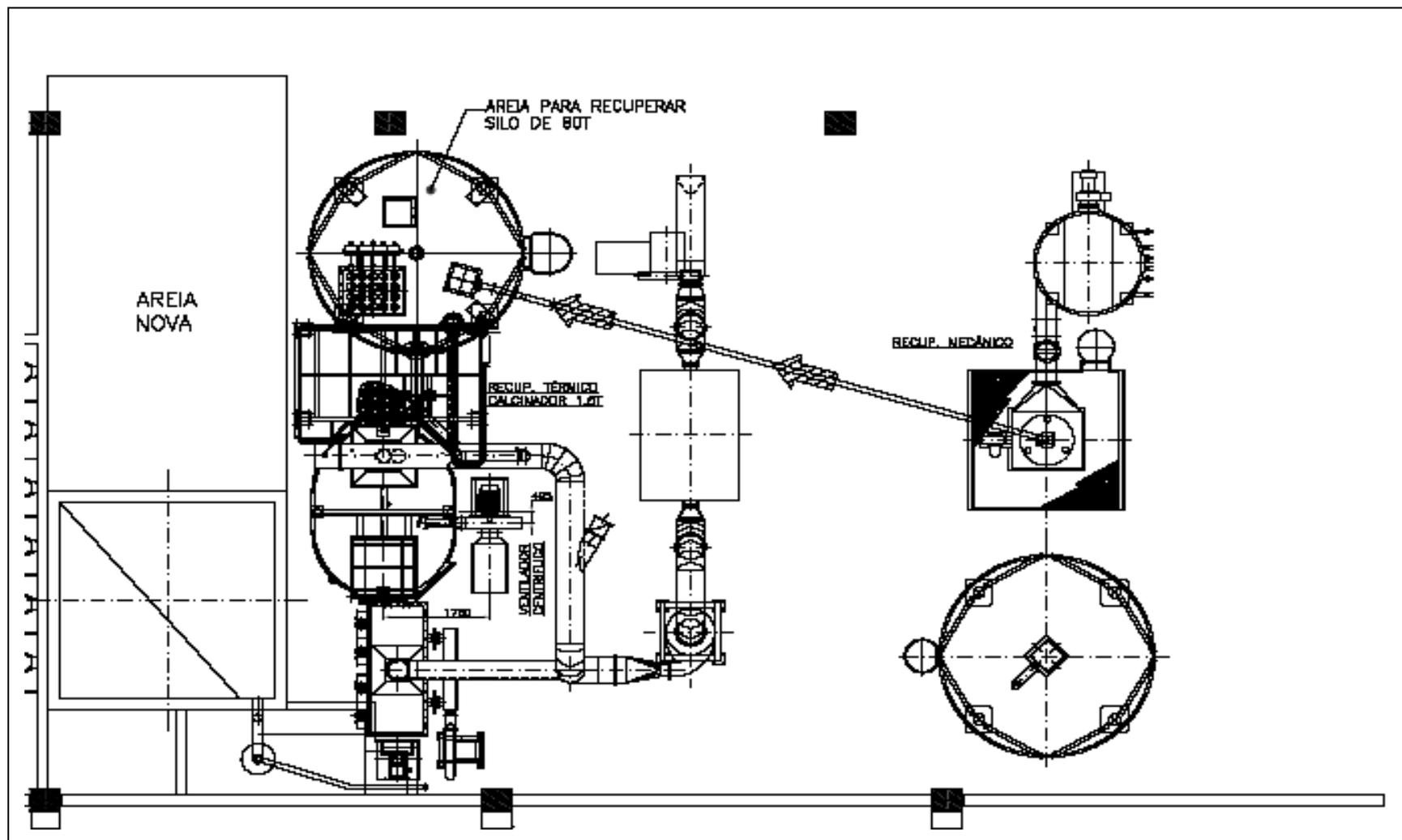


Figura 27 - Planta do sistema de recuperação de areia  
 Fonte: Desenho do fabricante do calcinador (2004).

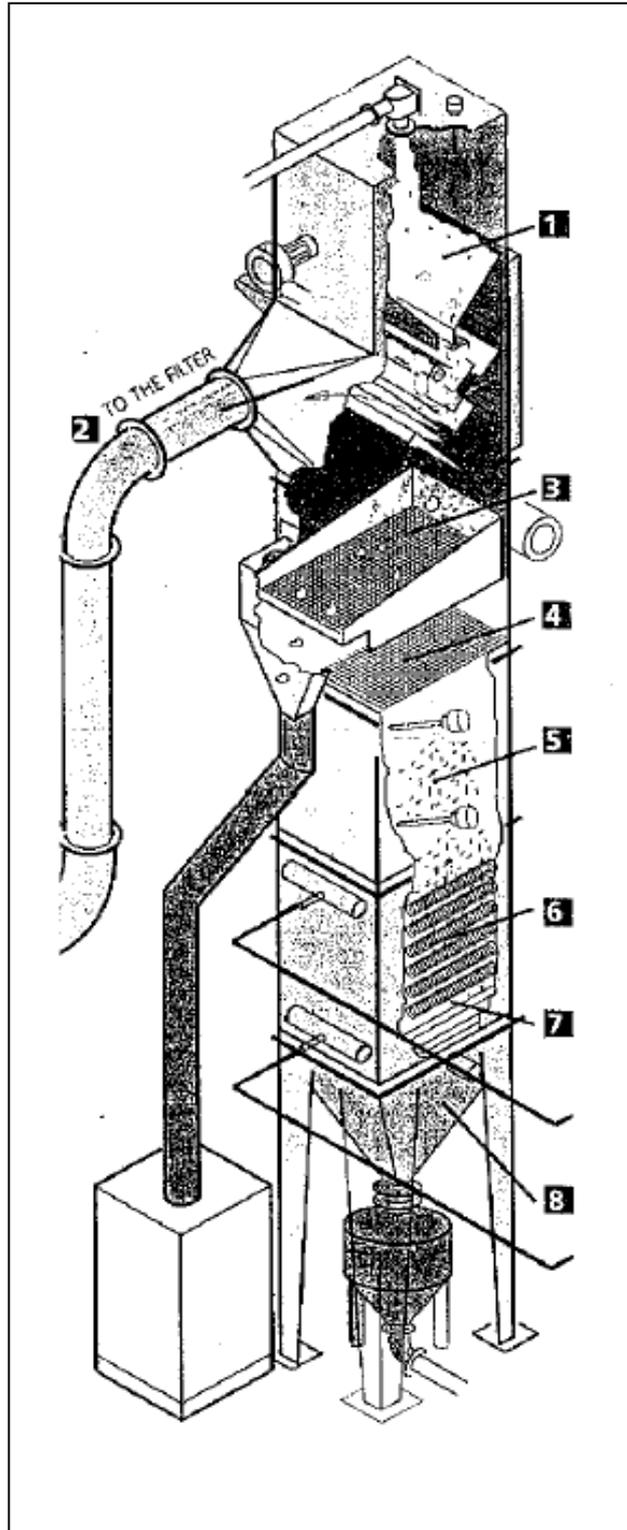


Figura 28 - Sistema de recuperação mecânica  
Fonte: Catálogo do fabricante do recuperador mecânico (2004)

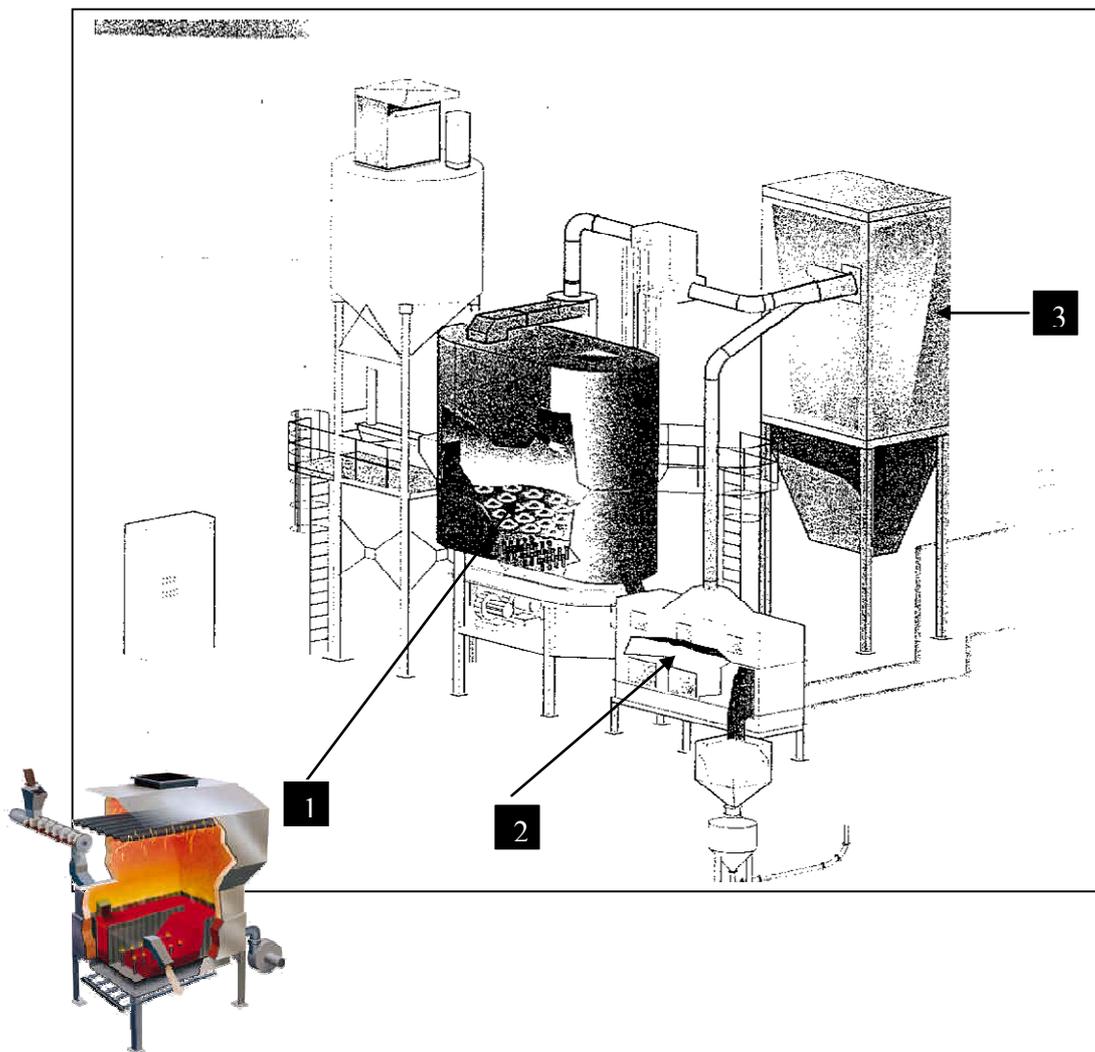


Figura 29 - Sistema de recuperação térmico  
Fonte: Adaptado do catálogo do fabricante do calcinador (2004)

#### **4.11 Controle das características da areia**

##### **a) Umidade**

Segundo Peixoto (2003), a simples presença de umidade, independentemente da quantidade, tem efeito negativo nas reações químicas da resina. O principal problema está na reação indesejada entre a água e o isocianato da Parte 2 da resina fenólica uretânica, reação que altera de forma negativa as propriedades de aderência do ligante, reduzindo a resistência mecânica.

##### **b) Granulometria**

Conforme Fernandes (2004), a areia de base utilizada no processo de fundição possui partículas variando de 0,05 a 2 mm em diâmetro e outras tão pequenas que não se qualificam, pois apresentam dimensões abaixo de 0,05mm de diâmetro.

Segundo Peixoto (2003), a distribuição granulométrica da areia consiste em uma característica importante, estando diretamente relacionada a defeitos superficiais do fundido e também à quantidade de resina consumida no processo.

A determinação de granulometria é realizada através de um ensaio que consiste na separação dos grãos em diferentes peneiras. Assim, os grãos são separados conforme seu tamanho e se obtém a distribuição do peso individual das frações. Nesse ensaio, temos os resultados do teor de argila AFS ou total, módulo de finura, teor de finos e concentração granulométrica.

##### **c) Teor de finos**

Ainda segundo Peixoto (2003), o teor de finos representa o material retido nas duas últimas peneiras do referido ensaio anterior e no prato. Os grãos finos impedem que a resina seja dispersa uniformemente, fazendo com que o ligante e esses grãos finos se aglomerem, entre outros problemas.

##### **d) Temperatura**

Conforme Peixoto (2003), a temperatura da areia é uma característica do processo importante que interfere na taxa de reação. A temperatura da areia é um fator determinante, pois interfere na taxa de reação do elemento ligante e conseqüentemente nas propriedades

mecânicas e na vida útil da mistura da resina, a qual diminui com temperaturas altas e aumenta com temperaturas baixas.

e) Perda ao fogo

Este ensaio tem por objetivo determinar o teor de material orgânico contido na areia, sendo básico para avaliar as características e a eficiência da sua regeneração. É realizado através da queima/decomposição e eliminação de materiais orgânicos presentes nos sólidos a uma temperatura entre 900/980 °C.

#### 4.12 Ensaios realizados na areia do processo de fabricação

Para definição dos valores de descarte da areia resinada, bem como de outros valores do balanço de massa, foram realizados diversos ensaios para controle do processo referente à recuperação da areia, entre os quais se destacam os ensaios apresentados nas tabelas 6, 7 e 8.

Tabela 6 - Características de controle da areia nova

<b>Ensaios</b> <b>Dados</b>	<b>Umidade</b>	<b>Granulometria</b>	<b>Teor de finos</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Perda ao fogo</b>
<b>Unidade</b>	%	AFS	%	°C	%
<b>Média</b>	0,03	52,35	0,12	27	0,15
<b>Desvio Padrão</b>	0,00	0,00	0,00	0	0,00
<b>Mínimo</b>	0,00	40	0,00	20	0,00
<b>Máximo</b>	0,20	60	1,00	35	1,50

A tabela 6 apresenta os resultados de umidade, granulometria, teor de finos, temperatura e perda ao fogo da areia nova, conforme os ensaios descritos neste estudo.

Durante os 15 dias de coleta das amostras, ocorreu apenas um recebimento de areia nova, ou seja, apenas 1 amostra foi inspecionada. Por esse motivo, o desvio foi nulo para areia nova. Os ensaios foram realizados conforme procedimentos internos da empresa. A areia nova mostrou as melhores características técnicas entre os três tipos de amostras.

A tabela 7 mostra os resultados de umidade, granulometria, teor de finos, temperatura e perda ao fogo da areia recuperada mecanicamente. São apresentados os valores médios de cada ensaio, bem como os desvios padrões desta amostragem, conforme a descrição feita neste estudo.

Tabela 7 - Características de controle da areia recuperada mecanicamente

<b>Ensaios</b> <b>Dados</b>	<b>Umidade</b>	<b>Granulometria</b>	<b>Teor de finos</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Perda ao fogo</b>
<b>Unidade</b>	%	AFS	%	°C	%
<b>Média</b>	0,05	47,34	0,69	30,00	1,13
<b>Desvio Padrão</b>	0,03	3,61	0,35	0,63	0,13
<b>Mínimo</b>	0,00	40	0,00	20	0,00
<b>Máximo</b>	0,20	60	1,00	35	1,50

Diariamente, durante 15 dias, foram retiradas amostras do processo, conforme os procedimentos internos da empresa. A areia recuperada apenas mecanicamente demonstrou as piores características técnicas entre os três tipos de amostragem.

Tabela 8 - Características de controle da areia recuperada termicamente

<b>Ensaios</b> <b>Dados</b>	<b>Umidade</b>	<b>Granulometria</b>	<b>Teor de finos</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Perda ao fogo</b>
<b>Unidade</b>	%	AFS	%	°C	%
<b>Média</b>	0,04	46,43	0,41	30,13	0,40
<b>Desvio Padrão</b>	0,03	3,05	0,27	0,81	1,49
<b>Mínimo</b>	0,00	40	0,00	20	0,00
<b>Maximo</b>	0,20	60	1,00	35	1,50

A tabela 8 apresenta os resultados de umidade, granulometria, teor de finos, temperatura e perda ao fogo da areia recuperada mecanicamente e termicamente, conforme os ensaios descritos neste estudo. Constam na tabela os valores médios de cada ensaio, bem como os desvios padrões desta amostragem, conforme descrito neste estudo.

Diariamente, durante 15 dias, foram retiradas amostras do processo, conforme os procedimentos internos da empresa.

Esta areia recuperada termicamente mostrou características técnicas melhores que as da recuperada mecanicamente, mas inferiores que as da areia nova.

#### 4.13 Resultados e discussão

##### a) Ambiental

Conforme foi observado quando se utiliza o processo de recuperação térmica (calcinação), o volume de descarte de areia resinada uretânica é de 85% (aproximadamente), ou seja, ocorre uma redução drástica do volume de areia a ser descartado. Este percentual é o mesmo independentemente do volume de produção, devido a essa redução ocorrer de forma linear. Em relação à reposição de matéria-prima (areia nova), a redução também é 85%.

Mesmo com a recuperação térmica, ainda ocorrem perdas durante o processo, tais como os finos (retidos nos filtros do processo de recuperação mecânica e térmica) e os torrões separados na recuperação mecânica. Essas perdas giram em torno de 4%, em média, sendo que este volume deve ser repostado.

Considerando os valores encontrados para o descarte, o processo de recuperação térmica é altamente eficiente, visto que para a sua realização necessita-se apenas de gás natural para elevação da temperatura das câmeras internas.

Nos anexos, são apresentadas as tabelas do balanço de massa realizado para diferentes valores de produção. Observa-se que os valores gerais têm comportamento de crescimento linear, acompanhando o volume de produção.

Outra conclusão relevante do ponto de vista ambiental foi que, se analisado a partir da sistemática definida da norma ABNT 10.004:2004, o resíduo do processo de fundição pode ser classificado como Classe IIA - Não perigoso - não inerte. Porém, se os seus constituintes forem analisados separadamente, este mesmo resíduo poderia ser classificado como Classe I - Perigoso, pois alguns de seus componentes são perigosos (tóxicos), conforme ensaio realizado com a análise de fenol. Isto aponta uma potencial falha na norma em questão, que admite a possibilidade de uma classificação inadequada de um resíduo tóxico como o fenol, sem ao menos exigir ensaios suplementares para confirmar que o resíduo não oferece riscos ambientais e para a saúde dos envolvidos.

Outro fato observado é que existe a possibilidade de se encontrar diversas aplicações para os resíduos gerados como, por exemplo: a incorporação de areia de fundição nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q., conforme Bonet (2002); a reutilização da areia preta de fundição na construção civil, conforme Bonin (1994); a fabricação de tijolos, conforme Santos (2003); entre outros estudos realizados no Brasil com várias linhas de trabalho.

A grande redução nos volumes resíduo e a viabilidade o seu reúso demonstram que o resultado da implantação de um equipamento de calcinação é altamente vantajoso.

## b) Financeiro

A redução do volume de descarte e do volume de areia a ser reposta seria de 85%, o que elimina as despesas com os descartes e com a reposição da areia que deixaria de ser reutilizada. Além vantagem da grande redução do volume.

Para uma fundição de médio porte (150 ton/mês), com o uso do calcinador a redução do custo de descarte seria de R\$ 16.000,00/mês aproximadamente; para uma fundição de grande porte (500 ton/mês), a redução seria de R\$ 51.000,00/mês aproximadamente. Em todas as situações, o custo seria reduzido na ordem de 85% como uso do processo de calcinação em decorrência da redução dos volumes dos resíduos.

Caso a areia de fundição for classificada com resíduo perigoso Classe I (conforme NBR 10.004) a redução do custo de descarte seria proporcionalmente de 85% pelo fato de a redução ser no volume de resíduo para descarte.

Já a estimativa nacional de redução aproximada de 165.000 ton/mês gera uma redução de custo de aproximadamente R\$ 14 milhões/mês, para o resíduo classe IIA.

## c) Qualidade

A pesquisa mostrou que a qualidade final do produto manteve-se a mesma, seja com a calcinação da areia, seja sem o uso desse o processo, considerando os volumes de descarte descritos durante o trabalho. Quando se utiliza apenas o processo mecânico, o descarte de areia com resina deve ser realizado, para que se mantenham as características técnicas e, conseqüentemente, a qualidade dos produtos fundidos. Caso fosse adotado o reúso da areia de fundição resinada recuperada apenas mecanicamente, sem passar pela calcinação, o processo de fundição se tornaria inviável do ponto de vista da qualidade devido à geração de gases, provenientes da reação entre metal no estado líquido e a resina que permanece na areia, e à alteração das características originais dessa areia, o que produziria defeitos inaceitáveis nas peças fundidas. Assim, conclui-se que o uso de um processo de recuperação apenas mecânica implica o descarte da areia resinada. Durante os testes nos moldes confeccionados com areia resinada utilizada por duas vezes consecutivas, observaram-se não só defeitos decorrentes da formação de gases como também outros provocados pela reação entre a resina (em excesso) e o metal no estado líquido (em uma temperatura de aproximadamente 1.680°C).

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

#### **5.1 Conclusões**

Esta dissertação descreveu um estudo feito em uma fundição, um segmento industrial altamente poluidor, mas em uma empresa que tem a característica particular de dispor de equipamentos quanto ao tratamento dos resíduos sólidos com os maiores volumes descartes.

O estudo centrou-se na areia, um elemento indispensável para uma fundição. A pesquisa contemplou a avaliação e a comparação dos impactos ambientais de duas situações: a primeira, com a utilização do processo térmico para recuperar a areia após o seu uso na fundição e a segunda, sem o emprego desse processo. Diante dos estudos realizados, o processo de calcinação foi considerado altamente eficaz por permitir uma grande redução do volume de resíduos que são transformados em areia para reuso. Chega a 85% a redução do volume de descarte de areia.

Existem possibilidades de uso da areia descartada em blocos para construção civil ou em asfalto, mas ainda há necessidade de uma avaliação mais detalhada, que leve em conta as características do processo e, principalmente, da resina utilizada.

Apesar de os parâmetros serem típicos de um processo de incineração, deve-se deixar claro que não se trata de um incinerador e sim de um calcinador.

Apesar de serem possíveis ajustes no processo de recuperação para aumentar a sua eficiência, a calcinação da areia de fundição resinada é altamente eficaz.

Outra conclusão relevante do ponto de vista ambiental foi que existe uma potencial falha na norma em questão para a classificação do resíduo aqui estudado. Confrontando os constituintes da resina (fenol), com a sistemática de classificação desse resíduo, bem como dos dados que constam nos anexos da norma, existe a possibilidade de estar havendo uma classificação inadequada de um resíduo tóxico como o fenol; sem que ao menos se exijam ensaios suplementares para confirmar que o resíduo não oferece riscos ambientais e para a saúde dos envolvidos.

#### **5.2 Sugestões**

Deveria ser feito um estudo para se saber em que temperatura o fenol é eliminado da resina e quais os gases gerados nesse tratamento térmico. Esses dados seriam fundamentais para a tomada de decisões que envolvessem a necessidade de adquirir novos equipamentos

ou, até mesmo, para o encaminhamento de soluções que viabilizassem a própria retirada do fenol, o que evitaria a geração de emissões gasosas com impactos ambientais maiores.

Pelo fato de o processo de calcinação ser altamente propício à geração de gases tóxicos, sugere-se ainda a realização de um plano de teste de queima dos gases gerados durante o processo de tratamento térmico. Esse estudo teria o objetivo de verificar a eficácia do tratamento dos gases ainda no calcinador. Caso necessário, poderiam ser feitas alterações na temperatura e/ou no tempo da permanência dos gases na câmara visando reduzir características indesejadas nos gases.

Outra sugestão importante é que se faça uma análise crítica da norma NBR 10.004, pois existe nessa norma uma falha em potencial no que refere à classificação do fenol, devido à pré-classificação da areia de fundição (que pode conter essa substância) como sendo um resíduo não perigoso. Não foi levado em consideração que a própria norma descreve o fenol como uma substância que confere periculosidade ao resíduo. Desse modo, empresas sem compromisso ambiental poderão se beneficiar desse fato para redução dos custos de descarte dos resíduos de fundição.

## REFERÊNCIAS

AFS - PLANT ENGINEERING COMMITTEE (TC-1). Sand reclamation: an equipment update. **Modern Casting**, n°.5, v.72, p.37-42, 1982.

ASHLAND RESINAS LTDA. **Boletim Técnico - Parte I: Resina fenólica uretânica**. Campinas.

\_\_\_\_\_. **Boletim Técnico - Parte II: Poliisocianato**. Campinas.

ALBERTUS, Hutteness. Sistema cold-box PUR reduz a emissão de odores nas fundições. **Fundição e serviços**, São Paulo, p 17-24. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO - ABIFA. Comissão de Meio Ambiente. In: CONGRESSO DE FUNDIÇÃO 95. **Anais do CONAF 95**, 1995. São Paulo: Associação Brasileira de Fundição, 1995. p 203.

\_\_\_\_\_. Comissão de Meio Ambiente. **Manual de Regeneração e Reúso de Areias de Fundição**. São Paulo: Associação Brasileira de Fundição, 1999. p. 1-49

\_\_\_\_\_. Comissão de Meio Ambiente. **Problemas Ambientais da Fundição no Brasil**. São Paulo: Associação Brasileira de Fundição. Disponível em: <[www.abifa.org.br](http://www.abifa.org.br)>. Acesso em: 23 mar. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.005**: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.006**: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

AUAD, Marco. **Roteiro para classificação de AFD na NBR 10004**. Três Corações: 2005.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - BNDS. **Indústria Brasileira de fundição - Segmento de peças para o setor automotivo**. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/conhecimento/bnset/fund1.pdf>>. Acesso em: 08 set. 2008.

BERNARDO E. Lins. Breve História da Engenharia da Qualidade. **Cadernos Aslegis**, Brasília, 4 (12): 53-65, set/dez 2000. Disponível em: <<http://www.dcce.ibilce.unesp.br/~adriana/ceq/Material%20complementar/histquali.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2007.

BONET, Ivan Ideraldo. **Valorização do Resíduo Areia de Fundição (RAF)**: Incorporação nas Massas Asfálticas do Tipo C.B.U.Q. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BONIN, A. L.; ROSSINI, A. J. **Reutilização da areia preta de fundição na construção civil**. Relatório Técnico do Departamento de Tecnologia Sanitária. Limeira: Ceset-Unicamp, 1994.

CASTRO, Roberto Lopes de. **Aglomerantes químicos para fundição Foseco**. São Paulo, 2008. Apresentação. Não publicado.

CHERTOW, Marian R. **The IPAT Equation and Its Variants: Changing Views of Technology and Environmental Impact**. New Haven: Yale University, CT USA, 2001. Disponível em: <www.abifa.org.br>. Acesso em: 05 nov. 2005.

COMISSÃO MUNDIAL DO MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso futuro comum**. Oxford, Inglaterra: Oxford University, 1987.

\_\_\_\_\_. **Nosso Futuro Comum**. 2 ed. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991.

DANTAS, J. M. **Montagem, Comissionamento e Operação de um Sistema de Recuperação de Areia de Fundição: Regenerador Térmico - Plano de Trabalho da Fase II**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2003.

DEMPSEY, Clyde R.; OPPELT E, Timothy. **Incineração de resíduos perigosos**. Trad. Milton Notrio Sogabe. São Paulo: Air & Waste Management Association, seção Brasil, 1999. 78 p.

DIAGNÓSTICO da indústria da fundição no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: Instituto Euvaldo Lodi - IEL-MG / SIFUMG, 2003. 61p.

FATTA, D. M. et al. Industrial pollution and control measures for a foundry in Cyprus. **Journal of Cleaner Production**, Volume 12, Issue 1, February, 2004, P. 29-36.

FERNANDES, Deilon Lopes. **Areias de fundição aglomeradas com ligantes fenólicos-uretânicos - Caixa fria**. 1 ed. Itaúna: SENAI-DR. MG, 2004. 55 p.

GORNI, Antônio Augusto. Artigo técnico sobre o processamento de areia para moldagem em fundições. **Revista fundição e serviço**, São Paulo, p 18-19, Julho 2005.

GRAEDEL, T. E; ALLENBY, B. R. **Ecologia industrial**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1995.

GUEDES, A. M. F. M. **Oxidação química com reagente de fenton: Aplicação às águas de cozimento da cortiça**. 2000. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 1998. Apud CASTRO, J.P.; FARIA, P. **Oxidação química com reagente Fenton - Projeto e investigação**. Departamento de Engenharia Química. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. 2000.

HAO, Jiming; WANG Litao. Air quality impacts of power plant emissions in Beijing. **Environmental Pollution**, Volume 147, Issue 2, Pages 401-408, 2007.

HUESEMANN, M. H. The limits of technological solutions to sustainable development. **Clean Techn Environ Policy**, 5, p 21-34, 2003.

IMPIANTI MACCHINE FONDERIA. **Catálogo: Mechanical sand reclamation**. 2004.

\_\_\_\_\_. **Catálogo: Gas Fired Sand Reclamation**. 2004.

\_\_\_\_\_. **Manual simplificado de funcionamento e operação do calcinador**. 2004.

KING, Richard E.; EKETI, Ihuorria B. Environmental effects of instream sand excavation on the hydrochemistry of a Nigerian headwater stream. **International Journal of Mining - Reclamation and Environment**, Volume 11, Issue 2 1997, p. 75 - 78.

KOYUNCU, Hakan. DEMIRBAS, Ayhan. An investigation of waste foundry sand in asphalt concrete mixtures. **Waste Management & Research**, UK. 2006. 24. p. 269-274.

LOPES, Luiz Rogério Natividade; ESTRELA, Danilo Pereira. **Melhoria da qualidade: redução de horas de retrabalho na produção de válvulas industriais**. 2003. 111 p. Monografia (MBA em Gestão da Qualidade) Programa de Educação Continuada em Engenharia - PECE, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

LUSCOMBE, Darryl. **Dioxinas e furanos: efeitos sobre a saúde humana**. São Paulo: Greenpeace, 1999. 15 p.

MARINHO, Maerbal Bittencourt. **Novas relações sistema produtivo/meio ambiente**. 2001. 198 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2001.

MARINHO, M. B.; KIPERSTOK, A. Ecologia industrial e prevenção da poluição: uma contribuição ao debate regional. **Tecbahia - Revista Baiana de Tecnologia**, Camaçari, v. 15, n. 2, p. 47-55, 2000.

MARINHO, Márcia Mara O. A sustentabilidade, as corporações e o papel dos instrumentos voluntários de gestão ambiental: uma reflexão sobre conceitos e perspectivas. **Bahia Análise e Dados**, Salvador, v.10, n.4, p. 342-349, 2001.

MARIOTTO, Luiz Cláudio. **Areias de Moldagem Aglomeradas com Argila**. São Paulo: IPT, 1978.

MARIOTTO, Luiz Cláudio. Regeneração de areias: uma tentativa de discussão sistemática. **Revista Fundição & Matérias-Primas**, Caderno Técnico, São Paulo nº. 42, v. 33, p. A-T, 2000.

MARIOTTO, Luiz Cláudio. **Regeneração de areias de fundição**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 11 p.

MOURA, Luiz Antônio Abdalla de. **Qualidade e Gestão Ambiental: sugestões para implantação da norma ISO 14.000 nas empresas**. 2. ed. São Paulo: Juarez de Oliveira, 2000. 256 p.

OKIDA, José Roberto. **Estudo para minimização e reaproveitamento de resíduos sólidos de fundição**. 2006. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica do Paraná, Ponta Grossa, 2006.

PEARCE, D. W. **Economic values and the natural world**. Massachusetts: MIT, USA, 1993. 129 p.

PEIXOTO, Fabiano. **Regeneração Térmica de Areia Ligada Quimicamente**. 2003. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos Avançados). Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2003.

PROSANTO Sethi, Abhishek Nath and Sanjeev Swami. Towards cleaner technologies in small and micro enterprises: a process-based case study of foundry industry in India. **Journal of Cleaner Production**, in Press, Corrected Proof. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 27 mar. 2008.

PORTER, Michael E.; VAN der LINDE, Class. Ser verde também é ser competitivo. **Revista Exame**, São Paulo, n.24, ed.597, p 72-78, novembro, 1995.

PROJETO FAPESP - PLANO DE TRABALHO. **Implantação de uma Unidade de Reaproveitamento de Areia de Fundição Contaminada com Resina Fenólica por Processo Térmico**. São Paulo, 2003.

REDDI, Lakhmi et al. Stabilization of phenolics in foundry waste using cementitious materials. **Journal of Hazardous Materials**, 45, p 89-106, 1996.

RHODIA. **Catálogo Resina Fenólica**. Fenol Referência IPAS FP 0001/2005. São Paulo. Disponível em: <[www.rhodia.com.br](http://www.rhodia.com.br)>. Acesso em: 04 ago. 2008.

ROMANUS, Arnaldo. **Manual de defeitos & soluções - Moldagem em areia Verde**. 1 ed. São Paulo: ABIFA, 1991. 478 p.

SACKHEIM George I.; LEHMAN, Dennis D. **Química e Bioquímica para Ciências Biomédicas**. 8 ed. São Paulo: Manole, 2005.

SANTOS, Raquel do Carmo. Produto à base de areia preta de fundição reutilizada é feito por interno de instituição em Limeira. Fábrica produz tijolo desenvolvido no Ceset. **Jornal da Universidade Estadual de Campinas**, Campinas, 14 a 20 de Julho de 2003.

SCHEUNEMANN, Ricardo. **Regeneração de areia de fundição através de tratamento químico via processo Fenton**. 2005. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TINTAS E VERNIZES ONLINE. Resina Fenólica. Responsável técnico: Antonio Intini. Disponível em: <<http://geocities.yahoo.com.br/tintasevernizes/fenolicas.htm>>. Acesso em: 09 ago. 2006.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT - WBCSD.  
**Measuring Eco-efficiency**: a Guide to Report Company Performance. Disponível em:  
<<http://www.wbcsd.org>>. Acesso em: 23 jun 2005.

\_\_\_\_\_. UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM - UNEP. **Eco-Efficiency and Cleaner Production**: Charting the Course for Sustainability. Paris: UNEP, 1997.

## Anexo A - Memória de cálculo

Para se chegar aos valores do balanço de massa, foram avaliados todos os materiais e matérias-primas utilizados durante o processo de fundição.

Em um primeiro momento, foram coletados dados para a determinação do rendimento metálico, ou seja, qual a razão entre o peso de peça produzido e o peso de metal gerado no processo de fundição. Após a coleta de dados durante o processo produtivo chegou-se à conclusão de que o rendimento metálico é de 60% (por este motivo a constante 1,6), ou seja:

$$\mathbf{MF = PT \times 1,6} \quad (1)$$

onde:

**MF** = Metal fundido (kg/mês)

**PT** = Produção total de peças prontas (kg/mês)

O rendimento metálico é um dos indicadores mais importantes da fundição, pois este parâmetro influencia diretamente nos custos de produção, uma vez que quanto maior for o seu valor, maior será o custo decorrente da matéria-prima, dos elementos de ligas, da energia utilizada, ou seja, de todos os principais insumos de produção.

Outro fator importante do rendimento é a faixa de operação relativamente longa. A extensão dessa faixa se deve aos tipos de peças, incluindo geometrias, espessura de parede, seções, mudanças de espessura de parede e seções, tipo de material e processo de fundição.

Com base nestes dados preliminares, foi possível realizar o balanço de massa para a fase inicial do processo, como descrito a seguir:

### Início do processo

$$\mathbf{TARIP = AS + R1 + R2 + CT + TI + AE} \quad (2)$$

onde:

**TARIP** = Total de areia resinada no início do processo (kg)

**AS** = Areia de sílica (kg)

**R1** = Resina parte 1 (kg)

**R2** = Resina parte 2 (kg)

**CT** = Catalisador (kg)

**TI** = Tinta (kg)

**AE** = Álcool etílico (kg)

O total de areia resinada no início do processo é a soma de todos os insumos envolvidos, ou seja, misturados à areia de base (ou areia de sílica) durante o processo de fabricação.

**AS** = **MF** x 4

**R1** = MF x 0,024

**R2** = MF x 0,024

**CT** = MF x 0,000024

**TI** = MF x 0,005

**AE** = MF x 0,000235

As constantes apresentadas para a resina: parte 1 (R1), a resina parte 2 (R2), o catalisador (CT), a tinta (TI) e o álcool etílico (AE), descritos acima, estão definidos nas recomendações do fabricante, não havendo nenhuma alteração dos mesmos no processo de fundição.

### **Final do processo**

Ao término do processo, têm-se os resíduos gerados, conforme demonstrado abaixo:

$$\mathbf{TARFP} = \mathbf{TARIP} \times \mathbf{0,97} + \mathbf{TARIP} \times \mathbf{0,01} \quad (3)$$

onde:

**TARFP** = Total de areia resinada no final do processo (kg)

**TARIP** = Total de areia resinada no início do processo (kg)

Por meio de levantamentos realizados, observou-se que quando termina a fabricação da peça há uma perda de 3% do volume de areia resinada na fundição, ou seja, tem-se um fator de multiplicação 0,97 do volume do início do processo (TARIP). Essa perda ocorre no sistema de transporte, recuperação e armazenamento da areia. Verificou-se também, através de coleta de resíduos durante a fabricação, uma perda de 1% da areia resinada, ou seja, tem-se

um fator de multiplicação 0,01 do volume do início do processo (TARIP) a somar ao volume total de areia resinada no final. As perdas somadas representam 4% do volume de areia resinada no início do processo, havendo uma variação de  $\pm 1\%$  deste volume total.

### **Entrada da recuperação mecânica**

A quantidade de resíduos sólidos que entra no recuperador mecânico é a mesma descrita no final do processo, ou seja, 100% do volume de TARFP (Total de areia resinada no final do processo) é recuperada mecanicamente.

### **Saída da recuperação mecânica**

Durante o processo de recuperação mecânica, os finos são separados dos torrões. Os valores alcançados no final da recuperação são obtidos a partir da seguinte equação:

$$\mathbf{TARM = TASFP \times 0,97} \quad (4)$$

onde:

**TARM** = Total de areia recuperada mecanicamente (kg)

**TASFP** = Total de areia resinada no final do processo (kg)

Para verificar os resíduos do processo de recuperação mecânica, tem-se:

$$\mathbf{TTRM = TASFP \times 0,02} \quad (5)$$

onde:

**TTRM** = Total de torrões no processo de recuperação mecânica (kg)

$$\mathbf{TFRM = TRSFP \times 0,01} \quad (6)$$

onde:

**TFRM** - Total finos no processo de recuperação mecânica (kg)

Durante o processo de recuperação mecânica, ocorre também a separação dos torrões e dos finos. O volume de torrões coletado nas peneiras do equipamento é de 2% e dos finos, nos filtros do equipamento, é de 1%. Devido a este fato temos a diferença de 97%. As constantes

descritas nas formulas (4), (5) e (6) são resultantes de levantamentos durante o processo de fabricação.

### **Entrada no calcinador**

Parte da areia recuperada mecanicamente é utilizada para enchimento dos moldes, o valor é encontrado da seguinte maneira:

$$\mathbf{TAPE = TARM \times 0,8} \quad (7)$$

onde:

$$\mathbf{TAPE = \text{Total de areia para enchimento (kg)}}$$

Mesmo não sendo um objetivo desta pesquisa, verificou-se que usar um volume de até 80% de uma areia não recuperada termicamente em um molde não provoca alterações no processo de fundição, desde que essa areia (recuperada apenas mecanicamente) não entre em contato direto com o metal. Por essa razão, foi definido que o fator de recuperação exclusivamente mecânica seria a 80%. Assim, 20% do volume total de areia recuperada mecanicamente deverão passar também pela recuperação térmica. Essa areia recuperada termicamente é a areia que vai estar em contato com o metal fundido. O valor obtido para o faceamento é encontrado da seguinte maneira:

$$\mathbf{TAPF = TARM \times 0,2} \quad (8)$$

onde:

$$\mathbf{TAPF = \text{Total de areia para faceamento (kg)}}$$

### **Saída do calcinador**

Durante o processo de calcinação, ocorrem perdas (finos coletados nos filtros do equipamento de calcinação) de 1%. Devido a este fato temos a diferença de 99%. As fórmulas para se chegar aos valores são as seguintes:

$$\mathbf{PF = TAPF \times 0,01} \quad (9)$$

e

$$\mathbf{TART = TAPF \times 0,99} \quad (10)$$

onde:

**PF** = Pó dos filtros

**TARM** = Total de areia recuperada termicamente (kg)

As constantes descritas nas formulas (9) e (10) são resultantes de levantamentos durante o processo de fabricação.

### **Processo continuado de produção**

Após os cálculos no início do processo, é realizado o balanço de massa em um processo continuado, conforme descrito a seguir:

$$\mathbf{APC = ARPEM + ARPFM} \quad (11)$$

onde:

**APC** = Areia do processo contínuo

**ARPEM** = Areia resinada para enchimento do molde (kg)

**ARPFM** = Areia resinada para faceamento do molde (kg)

A areia do processo contínuo (APC) é a soma da areia resinada para enchimento do molde (ARPEM), ou seja, a areia que foi tratada apenas pelo tratamento mecânico, e a areia resinada para faceamento do molde (ARPFM), ou seja, a areia que passou pelo tratamento mecânico e pelo tratamento térmico.

### **Areia resinada para enchimento do molde**

Portanto, ficou estabelecido que, para o enchimento do molde, poderia se usar a areia recuperada apenas mecanicamente. Isso reduziria não só o tempo gasto no próprio processo de recuperação de areia, mas também o uso de gás natural e, conseqüentemente, contribuiria para a redução dos impactos ambientais. Para que isso fosse realizado, chegou-se à seguinte fórmula:

$$\mathbf{ARPEM = AS \times 0,8 + R1 + R2 + CT + TI + AE} \quad (12)$$

onde:

**ARPEM** = Areia resinada para enchimento do molde (kg)

**AS** = Areia de sílica (kg)

**R1** = Resina parte 1 (kg)

**R2** = Resina parte 2 (kg)

**CT** = Catalisador (kg)

**TI** = Tinta (kg)

**AE** = Álcool etílico (kg)

e

**AS** = MF x 4

**R1** = MF x 0,0192

**R2** = MF x 0,0192

**CT** = MF x 0,00001536

**TI** = MF x 0,004

**AE** = MF x 0,0001504

As constantes apresentadas para a resina: parte 1 (R1), a resina parte 2 (R2), o catalisador (CT), a tinta (TI) e o álcool etílico (AE), descritos acima, estão definidos nas recomendações do fabricante, não havendo nenhuma alteração dos mesmos no processo de fundição.

#### **Areia resinada para faceamento do molde**

$$\mathbf{ARPEM = AS \times 0,2,} \quad (13)$$

onde:

**ARPFM** = Areia resinada para faceamento do molde (kg)

**AS** = Areia de sílica (kg)

**R1** = Resina parte 1 (kg)

**R2** = Resina parte 2 (kg)

**CT** = Catalisador (kg)

**TI** = Tinta (kg)

**AE** = Álcool etílico (kg)

e

$$\mathbf{AS} = \mathbf{MF} \times 4$$

$$\mathbf{R1} = \mathbf{MF} \times 0,0048$$

$$\mathbf{R2} = \mathbf{MF} \times 0,0048$$

$$\mathbf{CT} = \mathbf{MF} \times 0,000096$$

$$\mathbf{TI} = \mathbf{MF} \times 0,001$$

$$\mathbf{AE} = \mathbf{MF} \times 0,00094,$$

As constantes apresentadas para a resina: parte 1 (R1), a resina parte 2 (R2), o catalisador (CT), a tinta (TI) e o álcool etílico (AE), descritos acima, estão definidos nas recomendações do fabricante, não havendo nenhuma alteração dos mesmos no processo de fundição.

## Anexo A1 - Balanço de Massa - Produção 50 ton/mês.

Início Processo							
Produção (kg)	<b>50.000,0</b>	Peças Prontas		Rendimento	<b>60,0%</b>		
Metal Gerado (kg)	<b>80.000,0</b>	Metal fundido					
Produto	Base	Meio	Fator %	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total (Produção)	Unidade
Areia	Silica	Sólido	1,00	4	kg	320.000,00	kg
Resina Parte 1	Fenólica Uretânica	Líquido	0,01	0,024	kg	1920	kg
Resina Parte 2	Poliisociano	Líquido	0,01	0,024	kg	1920	kg
Catalizador	Fenil Propil Piridina	Líquido	0,00	0,000024	kg(1)	1,92	kg
Tinta	Zirconita	Pasta	0,01	0,005	kg	400	kg
Álcool Etilico	Álcool	Líquido	0,05	0,000235	kg(2)	18,8	kg
<b>Total</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>1,06</b>	<b>4,053259</b>	<b>kg</b>	<b>324.260,7</b>	<b>kg</b>
Final Processo							
Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
Areia resinada	Desconhecido	Sólido	0,97	3,93	kg	314.532,9	kg
Perdas no processo	Desconhecido	Diversos	0,01	0,04	kg	3.242,6	kg
<b>Total</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,97</b>	<b>3,93</b>	<b>kg</b>	<b>314.532,9</b>	<b>kg</b>
Entrada da Recuperação Mecânica							
Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
Areia resinada	Desconhecido	Sólido	1	3,93	kg	314.532,9	kg
Saída Recuperação Mecânica							
Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
<b>Areia Recup. Mec.</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>1</b>	<b>3,93</b>	<b>kg</b>	<b>314.532,9</b>	<b>kg</b>
Finos	Desconhecido	Sólido	0,02	0,08	kg	6.290,7	kg
Torrões	Desconhecido	Sólido	0,01	0,04	kg	3.145,3	kg
<b>Total</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,97</b>	<b>3,81</b>	<b>kg</b>	<b>305.096,9</b>	<b>kg</b>
Entrada no Calcinador							
Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
<b>Areia Recup. Mec.</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,2</b>	<b>0,79</b>	<b>kg</b>	<b>61.019,4</b>	<b>kg</b>
Saída Calcinador							
Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
<b>Areia Recup. Mec.</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>1</b>	<b>0,79</b>	<b>kg</b>	<b>61.019,4</b>	<b>kg</b>
<b>Pó dos filtros</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>kg</b>	<b>610,2</b>	<b>kg</b>
<b>Total</b>	<b>Silica</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,99</b>	<b>0,75</b>	<b>kg</b>	<b>60.409,2</b>	<b>kg</b>
Processo Continuado de Produção							
Areia Resinada para Enchimento do Molde							
Produto	Base	Meio	Fator %	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total (Produção)	Unidade
Areia	Silica	Sólido	0,80	3,2	kg	256000	kg
Resina Parte 1	Fenólica Uretânica	Líquido	0,01	0,0192	kg	1536	kg
Resina Parte 2	Poliisociano	Líquido	0,01	0,0192	kg	1536	kg
Catalizador	Fenil Propil Piridina	Líquido	0,00	0,00001536	kg(1)	1,2288	kg
Tinta	Zirconita	Pasta	0,01	0,004	kg	320	kg
Álcool Etilico	Álcool	Líquido	0,05	0,0001504	kg(2)	12,032	kg
<b>Sub - Total</b>		<b>Sólido</b>	<b>0,86</b>	<b>3,24256576</b>	<b>kg</b>	<b>259.405,3</b>	<b>kg</b>
Processo Continuado de Produção							
Areia Resinada para Face de Contato do Molde							
Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
Areia	Silica	Sólido	0,20	0,8	kg	64000	kg
Resina Parte 1	Fenólica Uretânica	Líquido	0,01	0,0048	kg	384	kg
Resina Parte 2	Poliisociano	Líquido	0,01	0,0048	kg	384	kg
Catalizador	Fenil Propil Piridina	Líquido	0,00	0,00000096	kg(1)	0,0768	kg
Tinta	Zirconita	Pasta	0,01	0,001	kg	80	kg
Álcool Etilico	Álcool	Líquido	0,05	0,00000094	kg(2)	0,752	kg
<b>Sub - Total</b>		<b>Sólido</b>	<b>0,26</b>	<b>0,81061036</b>	<b>kg</b>	<b>64.848,8</b>	<b>kg</b>
<b>Total</b>						<b>324.254,1</b>	

## Anexo A2 - Balanço de Massa - Produção 50 ton/mês.

Produção (kg)	50.000,0	Peças Prontas	Rendimento	60,0%
Metal Gerado (kg)	80.000,0	Metal fundido		

### Resíduos com Processo de Calcinação

#### Processo de Recuperação Mecânica

Resíduo	Base	Meio	Fator	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total	Unidade
Finos	Desconhecido	Sólido	0,02	0,078633225	kg	6.290,7	kg
Torrões	Desconhecido	Sólido	0,01	0,039316612	kg	3.145,3	kg
<b>Sub Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido	0,03		kg	<b>9.436,0</b>	<b>kg</b>

#### Processo de Recuperação Térmica

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total	Unidade
Finos dos filtros	Desconhecido	Sólido	0,01	0,04	kg	610,2	kg
<b>Sub Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido		0,16	kg	<b>610,2</b>	<b>kg</b>

<b>Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido	0,04	0,16	kg	<b>10.046,2</b>	<b>kg</b>
--------------------------	--------------	--------	------	------	----	-----------------	-----------

### Resíduos sem Processo de Calcinação

#### Processo no Recuperação Mecânica

Resíduo	Base	Meio	Fator	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total	Unidade
Finos	Desconhecido	Sólido	0,02	0,078633225	kg	6.290,7	kg
Torrões	Desconhecido	Sólido	0,01	0,039316612	kg	3.145,3	kg
Descarte areia resinada	Desconhecido	Sólido	0,2	0,79	kg	61.019,4	kg
<b>Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido	0,23	0,904282083	kg	<b>70.455,4</b>	<b>kg</b>

### Anexo A3 - Balanço de Massa - Produção 50 ton/mês.

#### Início Processo

Produção (kg)	50.000,0	Peças Prontas
Metal Gerado (kg)	80.000,0	Metal fundido

	Tipo de descarte	Unidade	Valor
Custo 1	São Paulo (sem frete) R\$ Classe I - Resíduo Perigoso	R\$	R\$ 250,00
Custo 2	São Paulo (sem frete) R\$ Classe IIA - Resíduo Não Perigoso Perigoso/Não Inerte	R\$	R\$ 85,00

	Total	Unidade	Custo 1	Custo 2
Custo de descarte com processo de Recuperação Térmica	10.046,18	kg	R\$ 2.511,55	R\$ 853,93
Custo de descarte sem processo de Recuperação Térmica	70.455,37	kg	R\$ 17.613,84	R\$ 5.988,71

	Total	Unidade	Custo Unitário	Custo Total	
Total Matério Prima	Areia para reposição com processo de calcinação	10.046,18	kg	R\$ 0,04	<b>R\$ 401,85</b>
Total Matério Prima	Areia para reposição sem processo de calcinação	70.455,37	kg	R\$ 0,04	<b>R\$ 2.818,21</b>
Diferença		60.409,19	kg	R\$ 0,04	<b>R\$ 2.416,37</b>

#### Custo Total

	Unidade	Custo 1	Custo 2
Custo de descarte com processo de Recuperação Térmica	kg	R\$ 2.913,39	R\$ 1.255,77
Custo de descarte sem processo de Recuperação Térmica	kg	R\$ 20.432,06	R\$ 8.806,92

## Anexo B1 - Balanço de Massa - Produção 150 ton/mês.

### Início Processo

Produção (kg)	<b>150.000,0</b>	Peças Prontas	Rendimento	<b>60,0%</b>
Metal Gerado (kg)	<b>240.000,0</b>	Metal fundido		

Produto	Base	Meio	Fator %	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total (Produção)	Unidade
Areia	Silica	Sólido	1,00	4	kg	960.000,00	kg
Resina Parte 1	Fenólica Uretânica	Líquido	0,01	0,024	kg	5760	kg
Resina Parte 2	Poliisociano	Líquido	0,01	0,024	kg	5760	kg
Catalizador	Fenil Propil Piridina	Líquido	0,00	0,000024	kg(1)	5,76	kg
Tinta	Zirconita	Pasta	0,01	0,005	kg	1200	kg
Álcool Etílico	Álcool	Líquido	0,05	0,000235	kg(2)	56,4	kg
<b>Total</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>1,06</b>	<b>4,053259</b>	<b>kg</b>	<b>972.782,2</b>	<b>kg</b>

### Final Processo

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
Areia resinada	Desconhecido	Sólido	0,97	3,93	kg	943.598,7	kg
Perdas no processo	Desconhecido	Diversos	0,01	0,04	kg	9.727,8	kg
<b>Total</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,97</b>	<b>3,93</b>	<b>kg</b>	<b>943.598,7</b>	<b>kg</b>

### Entrada da Recuperação Mecânica

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
Areia resinada	Desconhecido	Sólido	1	3,93	kg	943.598,7	kg

### Saída Recuperação Mecânica

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
<b>Areia Recup. Mec.</b>	Desconhecido	Sólido	1	3,93	kg	<b>943.598,7</b>	kg
Finos	Desconhecido	Sólido	0,02	0,08	kg	18.872,0	kg
Torrões	Desconhecido	Sólido	0,01	0,04	kg	9.436,0	kg
<b>Total</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,97</b>	<b>3,81</b>	<b>kg</b>	<b>915.290,7</b>	kg

### Entrada no Calcificador

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
<b>Areia Recup. Mec.</b>	Desconhecido	Sólido	0,2	0,79	kg	<b>183.058,1</b>	kg

### Saída Calcificador

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
<b>Areia Recup. Mec.</b>	Desconhecido	Sólido	1	0,79	kg	<b>183.058,1</b>	kg
<b>Pó dos filtros</b>	Desconhecido	Sólido	0,01	0,04	kg	<b>1.830,6</b>	kg
<b>Total</b>	<b>Silica</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,99</b>	<b>0,75</b>	<b>kg</b>	<b>181.227,6</b>	kg

### Processo Continuado de Produção

#### Areia Resinada para Enchimento do Molde

Produto	Base	Meio	Fator %	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total (Produção)	Unidade
Areia	Silica	Sólido	0,80	3,2	kg	768000	kg
Resina Parte 1	Fenólica Uretânica	Líquido	0,01	0,0192	kg	4608	kg
Resina Parte 2	Poliisociano	Líquido	0,01	0,0192	kg	4608	kg
Catalizador	Fenil Propil Piridina	Líquido	0,00	0,00001536	kg(1)	3,6864	kg
Tinta	Zirconita	Pasta	0,01	0,004	kg	960	kg
Álcool Etílico	Álcool	Líquido	0,05	0,0001504	kg(2)	36,096	kg
<b>Sub - Total</b>		<b>Sólido</b>	<b>0,86</b>	<b>3,24256576</b>	<b>kg</b>	<b>778.215,8</b>	<b>kg</b>

### Processo Continuado de Produção

#### Areia Resinada para Face de Contato do Molde

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
Areia	Silica	Sólido	0,20	0,8	kg	192000	kg
Resina Parte 1	Fenólica Uretânica	Líquido	0,01	0,0048	kg	1152	kg
Resina Parte 2	Poliisociano	Líquido	0,01	0,0048	kg	1152	kg
Catalizador	Fenil Propil Piridina	Líquido	0,00	0,00000096	kg(1)	0,2304	kg
Tinta	Zirconita	Pasta	0,01	0,001	kg	240	kg
Álcool Etílico	Álcool	Líquido	0,05	0,0000094	kg(2)	2,256	kg
<b>Sub - Total</b>		<b>Sólido</b>	<b>0,26</b>	<b>0,81061036</b>	<b>kg</b>	<b>194.546,5</b>	<b>kg</b>

**Total**

**972.762,3**

## Anexo B2 - Balanço de Massa - Produção 150 ton/mês.

Produção (kg)	<b>150.000,0</b>	Peças Prontas	<b>Rendimento</b>	<b>60,0%</b>
Metal Gerado (kg)	<b>240.000,0</b>	Metal fundido		

### Resíduos com Processo de Calcinação

#### Processo de Recuperação Mecânica

Resíduo	Base	Meio	Fator	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total	Unidade
Finos	Desconhecido	Sólido	0,02	0,078633225	kg	18.872,0	kg
Torrões	Desconhecido	Sólido	0,01	0,039316612	kg	9.436,0	kg
<b>Sub Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido	0,03		<b>kg</b>	<b>28.308,0</b>	<b>kg</b>

#### Processo de Recuperação Térmica

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total	Unidade
Finos dos filtros	Desconhecido	Sólido	0,01	0,04	kg	1.830,6	kg
<b>Sub Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido		0,16	<b>kg</b>	<b>1.830,6</b>	<b>kg</b>

<b>Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido	0,04	0,16	kg	<b>30.138,5</b>	<b>kg</b>
--------------------------	--------------	--------	------	------	----	-----------------	-----------

### Resíduos sem Processo de Calcinação

#### Processo no Recuperação Mecânica

Resíduo	Base	Meio	Fator	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total	Unidade
Finos	Desconhecido	Sólido	0,02	0,078633225	kg	18.872,0	kg
Torrões	Desconhecido	Sólido	0,01	0,039316612	kg	9.436,0	kg
Descarte areia resinada	Desconhecido	Sólido	0,2	0,79	kg	183.058,1	kg
<b>Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido	0,23	0,904282083	<b>kg</b>	<b>211.366,1</b>	<b>kg</b>

### Anexo B3 - Balanço de Massa - Produção 150 ton/mês.

#### Início Processo

Produção (kg)	<b>150.000,0</b>	Peças Prontas
Metal Gerado (kg)	<b>240.000,0</b>	Metal fundido

Tipo de descarte		Unidade	Valor
Custo 1	São Paulo (sem frete) R\$ Classe I - Resíduo Perigoso	R\$	R\$ 250,00
Custo 2	São Paulo (sem frete) R\$ Classe IIA - Resíduo Não Perigoso Perigoso/Não Inerte	R\$	R\$ 85,00

	Total	Unidade	Custo 1	Custo 2
Custo de descarte com processo de Recuperação Térmica	30.138,54	kg	R\$ 7.534,64	R\$ 2.561,78
Custo de descarte sem processo de Recuperação Térmica	211.366,11	kg	R\$ 52.841,53	R\$ 17.966,12

	Total	Unidade	Custo Unitário	Custo Total
Total Matério Prima Areia para reposição com processo de calcinação	30.138,54	kg	R\$ 0,04	<b>R\$ 1.205,54</b>
Total Matério Prima Areia para reposição sem processo de calcinação	211.366,11	kg	R\$ 0,04	<b>R\$ 8.454,64</b>
Diferença	181.227,57	kg	R\$ 0,04	<b>R\$ 7.249,10</b>

#### Custo Total

	Unidade	Custo 1	Custo 2
Custo de descarte com processo de Recuperação Térmica	kg	R\$ 8.740,18	R\$ 3.767,32
Custo de descarte sem processo de Recuperação Térmica	kg	R\$ 61.296,17	R\$ 26.420,76

## Anexo C1 - Balanço de Massa - Produção 500 ton/mês.

### Início Processo

Produção (kg)	<b>500.000,0</b>	Peças Prontas	Rendimento	<b>60,0%</b>
Metal Gerado (kg)	<b>800.000,0</b>	Metal fundido		

Produto	Base	Meio	Fator %	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total (Produção)	Unidade
Areia	Silica	Sólido	1,00	4	kg	3.200.000,00	kg
Resina Parte 1	Fenólica Uretânica	Líquido	0,01	0,024	kg	19200	kg
Resina Parte 2	Poliisociano	Líquido	0,01	0,024	kg	19200	kg
Catalizador	Fenil Propil Piridina	Líquido	0,00	0,000024	kg(1)	19,2	kg
Tinta	Zirconita	Pasta	0,01	0,005	kg	4000	kg
Álcool Etilico	Álcool	Líquido	0,05	0,000235	kg(2)	188	kg
<b>Total</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>1,06</b>	<b>4,053259</b>	<b>kg</b>	<b>3.242.607,2</b>	<b>kg</b>

### Final Processo

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
Areia resinada	Desconhecido	Sólido	0,97	3,93	kg	3.145.329,0	kg
Perdas no processo	Desconhecido	Diversos	0,01	0,04	kg	32.426,1	kg
<b>Total</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,97</b>	<b>3,93</b>	<b>kg</b>	<b>3.145.329,0</b>	<b>kg</b>

### Entrada da Recuperação Mecânica

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
Areia resinada	Desconhecido	Sólido	1	3,93	kg	3.145.329,0	kg

### Saída Recuperação Mecânica

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
<b>Areia Recup. Mec.</b>	Desconhecido	Sólido	1	3,93	kg	<b>3.145.329,0</b>	kg
Finos	Desconhecido	Sólido	0,02	0,08	kg	62.906,6	kg
Torrões	Desconhecido	Sólido	0,01	0,04	kg	31.453,3	kg
<b>Total</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,97</b>	<b>3,81</b>	<b>kg</b>	<b>3.050.969,1</b>	<b>kg</b>

### Entrada no Calcinador

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
<b>Areia Recup. Mec.</b>	Desconhecido	Sólido	0,2	0,79	kg	<b>610.193,8</b>	kg

### Saída Calcinador

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
<b>Areia Recup. Mec.</b>	Desconhecido	Sólido	1	0,79	kg	<b>610.193,8</b>	kg
<b>Pó dos filtros</b>	Desconhecido	Sólido	0,01	0,04	kg	<b>6.101,9</b>	kg
<b>Total</b>	<b>Silica</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,99</b>	<b>0,75</b>	<b>kg</b>	<b>604.091,9</b>	<b>kg</b>

### Processo Continuado de Produção

#### Areia Resinada para Enchimento do Molde

Produto	Base	Meio	Fator %	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total (Produção)	Unidade
Areia	Silica	Sólido	0,80	3,2	kg	2560000	kg
Resina Parte 1	Fenólica Uretânica	Líquido	0,01	0,0192	kg	15360	kg
Resina Parte 2	Poliisociano	Líquido	0,01	0,0192	kg	15360	kg
Catalizador	Fenil Propil Piridina	Líquido	0,00	0,00001536	kg(1)	12,288	kg
Tinta	Zirconita	Pasta	0,01	0,004	kg	3200	kg
Álcool Etilico	Álcool	Líquido	0,05	0,0001504	kg(2)	120,32	kg
<b>Sub - Total</b>		<b>Sólido</b>	<b>0,86</b>	<b>3,24256576</b>	<b>kg</b>	<b>2.594.052,6</b>	<b>kg</b>

### Processo Continuado de Produção

#### Areia Resinada para Face de Contato do Molde

Produto	Base	Meio	Fator %	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total (Produção)	Unidade
Areia	Silica	Sólido	0,20	0,8	kg	640000	kg
Resina Parte 1	Fenólica Uretânica	Líquido	0,01	0,0048	kg	3840	kg
Resina Parte 2	Poliisociano	Líquido	0,01	0,0048	kg	3840	kg
Catalizador	Fenil Propil Piridina	Líquido	0,00	0,00000096	kg(1)	0,768	kg
Tinta	Zirconita	Pasta	0,01	0,001	kg	800	kg
Álcool Etilico	Álcool	Líquido	0,05	0,0000094	kg(2)	7,52	kg
<b>Sub - Total</b>		<b>Sólido</b>	<b>0,26</b>	<b>0,81061036</b>	<b>kg</b>	<b>648.488,3</b>	<b>kg</b>

**Total**

**3.242.540,9**

## Anexo C2 - Balanço de Massa - Produção 500 ton/mês.

Produção (kg)	<b>500.000,0</b>	Peças Prontas	Rendimento	<b>60,0%</b>
Metal Gerado (kg)	<b>800.000,0</b>	Metal fundido		

### Resíduos com Processo de Calcinação

#### Processo de Recuperação Mecânica

Resíduo	Base	Meio	Fator	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total	Unidade
Finos	Desconhecido	Sólido	0,02	0,078633225	kg	62.906,6	kg
Torrões	Desconhecido	Sólido	0,01	0,039316612	kg	31.453,3	kg
<b>Sub Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido	0,03		kg	<b>94.359,9</b>	<b>kg</b>

#### Processo de Recuperação Térmica

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total	Unidade
Finos dos filtros	Desconhecido	Sólido	0,01	0,04	kg	6.101,9	kg
<b>Sub Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido		0,16	kg	<b>6.101,9</b>	<b>kg</b>

<b>Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido	0,04	0,16	kg	<b>100.461,8</b>	<b>kg</b>
--------------------------	--------------	--------	------	------	----	------------------	-----------

### Resíduos sem Processo de Calcinação

#### Processo no Recuperação Mecânica

Resíduo	Base	Meio	Fator	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total	Unidade
Finos	Desconhecido	Sólido	0,02	0,078633225	kg	62.906,6	kg
Torrões	Desconhecido	Sólido	0,01	0,039316612	kg	31.453,3	kg
Descarte areia resinada	Desconhecido	Sólido	0,2	0,79	kg	610.193,8	kg
<b>Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido	0,23	0,904282083	kg	<b>704.553,7</b>	<b>kg</b>

### Anexo C3 - Balanço de Massa - Produção 500 ton/mês.

#### Início Processo

Produção (kg)	500.000,0	Peças Prontas
Metal Gerado (kg)	800.000,0	Metal fundido

	Tipo de descarte	Unidade	Valor
Custo 1	São Paulo (sem frete) R\$ Classe I - Resíduo Perigoso	R\$	R\$ 250,00
Custo 2	São Paulo (sem frete) R\$ Classe IIA - Resíduo Não Perigoso Perigoso/Não Inerte	R\$	R\$ 85,00

		Total	Unidade	Custo 1	Custo 2
Custo de descarte com processo de Recuperação Térmica		100.461,81	kg	R\$ 25.115,45	R\$ 8.539,25
Custo de descarte sem processo de Recuperação Térmica		704.553,69	kg	R\$ 176.138,42	R\$ 59.887,06

		Total	Unidade	Custo Unitário	Custo Total
Total Matério Prima	Areia para reposição com processo de calcinação	100.461,81	kg	R\$ 0,04	R\$ 4.018,47
Total Matério Prima	Areia para reposição sem processo de calcinação	704.553,69	kg	R\$ 0,04	R\$ 28.182,15
Diferença		604.091,88	kg	R\$ 0,04	R\$ 24.163,68

#### Custo Total

	Unidade	Custo 1	Custo 2
Custo de descarte com processo de Recuperação Térmica	kg	R\$ 29.133,92	R\$ 12.557,73
Custo de descarte sem processo de Recuperação Térmica	kg	R\$ 204.320,57	R\$ 88.069,21

## Anexo D1 - Balanço de Massa - Produção 1000 ton/mês.

### Início Processo

Produção (kg)	<b>1.000.000,0</b>	Peças Prontas	Rendimento	<b>60,0%</b>
Metal Gerado (kg)	<b>1.600.000,0</b>	Metal fundido		

Produto	Base	Meio	Fator %	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total (Produção)	Unidade
Areia	Silica	Sólido	1,00	4	kg	6.400.000,00	kg
Resina Parte 1	Fenólica Uretânica	Líquido	0,01	0,024	kg	38400	kg
Resina Parte 2	Poliisociano	Líquido	0,01	0,024	kg	38400	kg
Catalizador	Fenil Propil Piridina	Líquido	0,00	0,000024	kg(1)	38,4	kg
Tinta	Zirconita	Pasta	0,01	0,005	kg	8000	kg
Álcool Etílico	Álcool	Líquido	0,05	0,000235	kg(2)	376	kg
<b>Total</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>1,06</b>	<b>4,053259</b>	<b>kg</b>	<b>6.485.214,4</b>	<b>kg</b>

### Final Processo

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
Areia resinada	Desconhecido	Sólido	0,97	3,93	kg	6.290.658,0	kg
Perdas no processo	Desconhecido	Diversos	0,01	0,04	kg	64.852,1	kg
<b>Total</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,97</b>	<b>3,93</b>	<b>kg</b>	<b>6.290.658,0</b>	<b>kg</b>

### Entrada da Recuperação Mecânica

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
Areia resinada	Desconhecido	Sólido	1	3,93	kg	6.290.658,0	kg

### Saída Recuperação Mecânica

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
<b>Areia Recup. Mec.</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>1</b>	<b>3,93</b>	<b>kg</b>	<b>6.290.658,0</b>	<b>kg</b>
Finos	Desconhecido	Sólido	0,02	0,08	kg	125.813,2	kg
Torrões	Desconhecido	Sólido	0,01	0,04	kg	62.906,6	kg
<b>Total</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,97</b>	<b>3,81</b>	<b>kg</b>	<b>6.101.938,2</b>	<b>kg</b>

### Entrada no Calcinador

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
<b>Areia Recup. Mec.</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,2</b>	<b>0,79</b>	<b>kg</b>	<b>1.220.387,6</b>	<b>kg</b>

### Saída Calcinador

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
<b>Areia Recup. Mec.</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>1</b>	<b>0,79</b>	<b>kg</b>	<b>1.220.387,6</b>	<b>kg</b>
<b>Pó dos filtros</b>	<b>Desconhecido</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>kg</b>	<b>12.203,9</b>	<b>kg</b>
<b>Total</b>	<b>Silica</b>	<b>Sólido</b>	<b>0,99</b>	<b>0,75</b>	<b>kg</b>	<b>1.208.183,8</b>	<b>kg</b>

### Processo Continuado de Produção

#### Areia Resinada para Enchimento do Molde

Produto	Base	Meio	Fator %	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total (Produção)	Unidade
Areia	Silica	Sólido	0,80	3,2	kg	5120000	kg
Resina Parte 1	Fenólica Uretânica	Líquido	0,01	0,0192	kg	30720	kg
Resina Parte 2	Poliisociano	Líquido	0,01	0,0192	kg	30720	kg
Catalizador	Fenil Propil Piridina	Líquido	0,00	0,00001536	kg(1)	24,576	kg
Tinta	Zirconita	Pasta	0,01	0,004	kg	6400	kg
Álcool Etílico	Álcool	Líquido	0,05	0,0001504	kg(2)	240,64	kg
<b>Sub - Total</b>		<b>Sólido</b>	<b>0,86</b>	<b>3,24256576</b>	<b>kg</b>	<b>5.188.105,2</b>	<b>kg</b>

### Processo Continuado de Produção

#### Areia Resinada para Face de Contato do Molde

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade	Unidade	Total	Unidade
Areia	Silica	Sólido	0,20	0,8	kg	1280000	kg
Resina Parte 1	Fenólica Uretânica	Líquido	0,01	0,0048	kg	7680	kg
Resina Parte 2	Poliisociano	Líquido	0,01	0,0048	kg	7680	kg
Catalizador	Fenil Propil Piridina	Líquido	0,00	0,00000096	kg(1)	1,536	kg
Tinta	Zirconita	Pasta	0,01	0,001	kg	1600	kg
Álcool Etílico	Álcool	Líquido	0,05	0,0000094	kg(2)	15,04	kg
<b>Sub - Total</b>		<b>Sólido</b>	<b>0,26</b>	<b>0,81061036</b>	<b>kg</b>	<b>1.296.976,6</b>	<b>kg</b>

**Total**

**6.485.081,8**

## Anexo D2 - Balanço de Massa - Produção 1000 ton/mês.

Produção (kg)	1.000.000,0	Peças Prontas	Rendimento	60,0%
Metal Gerado (kg)	1.600.000,0	Metal fundido		

### Resíduos com Processo de Calcinação

#### Processo de Recuperação Mecânica

Resíduo	Base	Meio	Fator	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total	Unidade
Finos	Desconhecido	Sólido	0,02	0,078633225	kg	125.813,2	kg
Torrões	Desconhecido	Sólido	0,01	0,039316612	kg	62.906,6	kg
<b>Sub Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido	0,03		<b>kg</b>	<b>188.719,7</b>	<b>kg</b>

#### Processo de Recuperação Térmica

Produto	Base	Meio	Fator	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total	Unidade
Finos dos filtros	Desconhecido	Sólido	0,01	0,04	kg	12.203,9	kg
<b>Sub Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido		0,16	<b>kg</b>	<b>12.203,9</b>	<b>kg</b>

<b>Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido	0,04	0,16	<b>kg</b>	<b>200.923,6</b>	<b>kg</b>
--------------------------	--------------	--------	------	------	-----------	------------------	-----------

### Resíduos sem Processo de Calcinação

#### Processo no Recuperação Mecânica

Resíduo	Base	Meio	Fator	Quantidade por kg de metal	Unidade	Total	Unidade
Finos	Desconhecido	Sólido	0,02	0,078633225	kg	125.813,2	kg
Torrões	Desconhecido	Sólido	0,01	0,039316612	kg	62.906,6	kg
Descarte areia resinada	Desconhecido	Sólido	0,2	0,79	kg	1.220.387,6	kg
<b>Total de Resíduos</b>	Desconhecido	Sólido	0,23	0,904282083	<b>kg</b>	<b>1.409.107,4</b>	<b>kg</b>

### Anexo D3 - Balanço de Massa - Produção 1000 ton/mês.

#### Início Processo

Produção (kg)	<b>1.000.000,0</b>	Peças Prontas
Metal Gerado (kg)	<b>1.600.000,0</b>	Metal fundido

	Tipo de descarte	Unidade	Valor
<b>Custo 1</b>	São Paulo (sem frete) R\$ Classe I - Resíduo Perigoso	R\$	<b>R\$ 250,00</b>
<b>Custo 2</b>	São Paulo (sem frete) R\$ Classe IIA - Resíduo Não Perigoso Perigoso/Não Inerte	R\$	<b>R\$ 85,00</b>

	Total	Unidade	Custo 1	Custo 2
<b>Custo de descarte com processo de Recuperação Térmica</b>	200.923,62	kg	R\$ 50.230,90	R\$ 17.078,51
<b>Custo de descarte sem processo de Recuperação Térmica</b>	1.409.107,38	kg	R\$ 352.276,85	R\$ 119.774,13

	Total	Unidade	Custo Unitário	Custo Total
<b>Total Matério Prima</b> Areia para reposição com processo de calcinação	200.923,62	kg	R\$ 0,04	<b>R\$ 8.036,94</b>
<b>Total Matério Prima</b> Areia para reposição sem processo de calcinação	1.409.107,38	kg	R\$ 0,04	<b>R\$ 56.364,30</b>
<b>Diferença</b>	1.208.183,77	kg	R\$ 0,04	<b>R\$ 48.327,35</b>

#### Custo Total

	Unidade	Custo 1	Custo 2
<b>Custo de descarte com processo de Recuperação Térmica</b>	kg	<b>R\$ 58.267,85</b>	<b>R\$ 25.115,45</b>
<b>Custo de descarte sem processo de Recuperação Térmica</b>	kg	<b>R\$ 408.641,14</b>	<b>R\$ 176.138,42</b>



**UFBA**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**

**PROGRAMA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI**

**MESTRADO PROFISSIONAL EM GERENCIAMENTO E  
TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS NO PROCESSO PRODUTIVO**

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA

CEP: 40.210-630

Tels: (71) 3283-9800

E-mail: [pei@ufba.br](mailto:pei@ufba.br)

Home page: <http://www.pei.ufba.br>