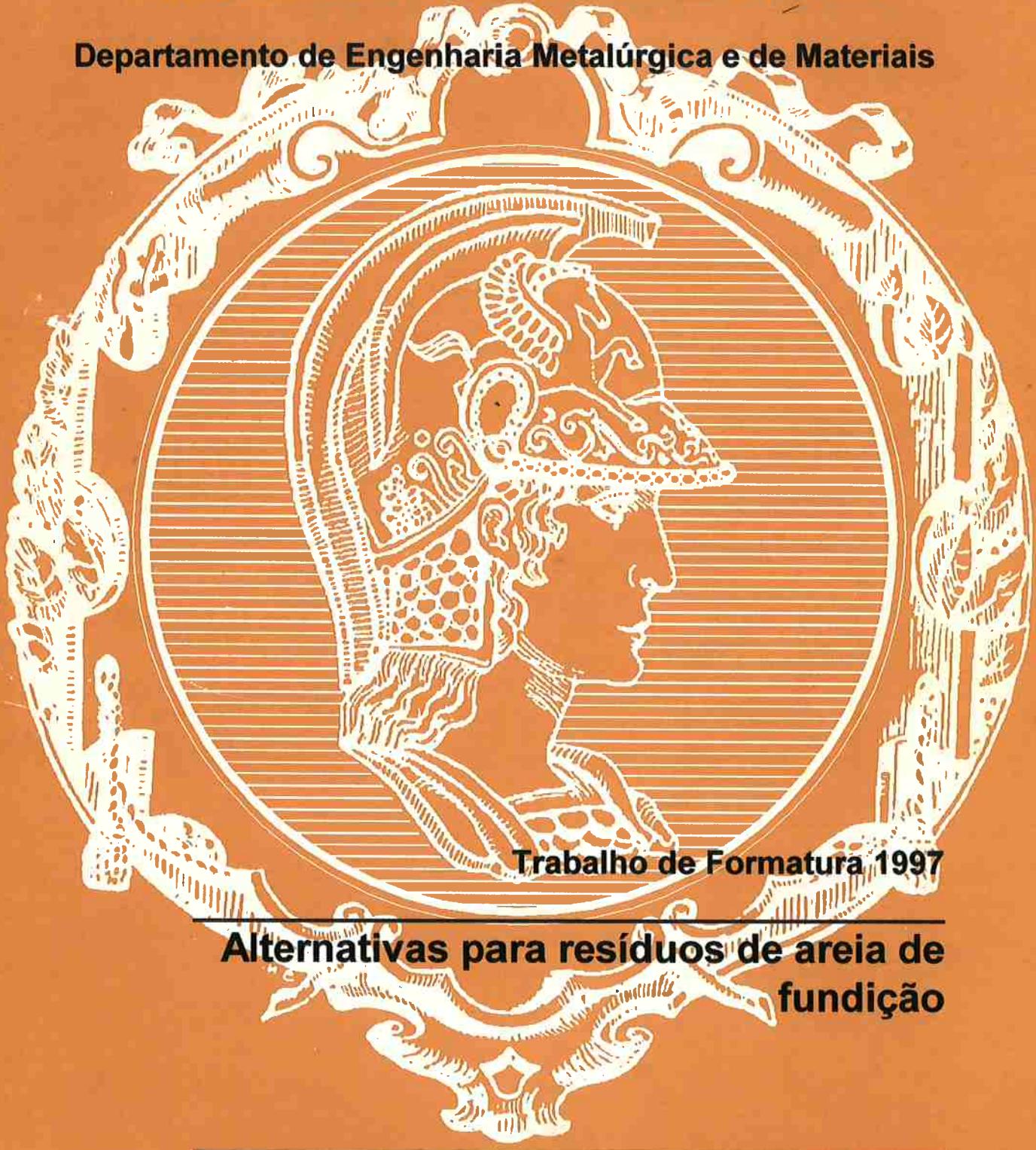


Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



Trabalho de Formatura 1997

Alternativas para resíduos de areia de fundição

Dimitri Warlet Caldeira

orientador: Erberto Francisco Gentile

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. FASES DO PROCESSO	4
3.1. MACHARIA	4
3.2. MOLDAGEM	4
3.3 JATEAMENTO	4
4. PONTOS DE CONTAMINAÇÃO	5
4.1. RETORNO DA AREIA DE MOLDAGEM	5
4.2. RESPINGOS	6
4.3. AREIA SHELL	6
4.4. JATEAMENTO	6
5. JATEAMENTO COM GRANALHAS	7
5.1. EQUIPAMENTO	7
5.2. PARÂMETROS DO PROCESSO DE JATEAMENTO	9
6. PARTE EXPERIMENTAL	13
6.1. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO	13
6.1.1. ANÁLISE QUÍMICA	13
6.1.2. ENSAIO GRANULOMÉTRICO	13
6.2. VARIÁVEIS DO PROCESSO	14
6.2.1. VOLUME DAS CARGAS	14
6.2.2. TEMPO DAS CARGAS	16
6.3. TRATAMENTO DO RESÍDUO	17
6.3.1. ENSAIO COM MESA VIBRATÓRIA	17
6.3.2. SEPARADOR ELETROSTÁTICO	18

7. RESULTADOS	21
7.1. JATEADORA	21
7.2. ENSAIOS	22
7.2.1. ENSAIO COM MESA VIBRATÓRIA	22
7.2.2. SEPARADOR ELETROSTÁTICO	23
8. DISCUSSÃO	24
8.1. JATEADORA	24
8.2. ENSAIOS	25
8.2.1. ENSAIO COM MESA VIBRATÓRIA	25
8.2.2. SEPARADOR ELETROSTÁTICO	26
9. CONCLUSÃO	27
10. BIBLIOGRAFIA	28

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Evolução dos custos de descarte	1
Tabela 2: Composição das ligas utilizadas para fundição de metais sanitários	2
Tabela 3: Teores metálicos presentes no resíduo de areia	2
Tabela 4: Análise química de cada ponto de geração de resíduo	13
Tabela 5: Distribuição granulométrica do resíduo de fundição captado nas jateadoras	14
Tabela 6: Evolução do acabamento superficial das peças em função do tempo de jateamento (carga completa - equivalente a 900 kg)	14
Tabela 7: Evolução do acabamento superficial das peças em função do tempo de jateamento (1/2 carga - equivalente a 450 kg)	15
Tabela 8: Análise química em função do tempo de processamento das peças nas jateadoras	16
Tabela 9: Materiais com potencial de separação em equipamento eletrostático	18
Tabela 10: Parâmetros utilizados no ensaio com separador eletrostático	20
Tabela 11: Análise química dos produtos obtidos no ensaio com mesa vibratória	22
Tabela 12: Resultados do processamento do resíduo de areia no separador eletrostático	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma do processo	4
Figura 2: Arranjo fisico dos principais pontos geradores de resíduo	5
Figura 3: Esteira transportadora e cabine de jateamento	8
Figura 4: Turbina, palhetas e o leque de abrasivos	9
Figura 5: Influência do volume de carga no desgaste do equipamento	10
Figura 6: Influência do tamanho das granulhas na eficiência do jateamento	11
Figura 7: Equipamento utilizado para o jateamento das peças	12
Figura 8: Jateamento de peças com carga completa	15
Figura 9: Jateamento de peças com carga parcial (1/2 carga)	16
Figura 10: Funcionamento da mesa vibratória	17
Figura 11: Mesa vibratória	18
Figura 12: Esquema de funcionamento do separador eletrostático	19
Figura 13: Separador eletrostático	19
Figura 14: Figura 14: Pormenores do desligamento automático do sistema de exaustão	22
Figura 15: Balanço de massa do resíduo processado	23

1. INTRODUÇÃO

A crescente pressão dos órgãos ambientais para a redução na deposição de resíduos de fundição nos aterros sanitários, sobretudo em função da disponibilidade cada vez mais restrita desses locais; a rápida evolução dos custos com descarte e o contínuo aumento do custo da matéria-prima, devido aos progressivos custos de frete, implicam na necessidade de se viabilizar a reciclagem desse material.

Para se ter uma idéia, o volume de areia descartado numa única fundição de bronze atinge a casa das 200 t / mês com previsões de crescimento em função de automação da linha de moldagem.

Paralelamente a esta previsão, os custos do descarte em aterro sanitário evoluíram da seguinte maneira:

Tabela 1: Evolução dos custos de descarte.

PERÍODO	CUSTO (US\$ / t)
abr / 95	20,33
mai / 96	32,06
fev / 97	54,64

Além disso, os custos com frete evoluíram significativamente, chegando ao patamar de US\$ 42,45 / 3,5 t de resíduo. Com isso tudo, o custo total com aterro sanitário atinge o valor de US\$ 66,77 / t resíduo.

Outro ponto a ser considerado é o teor de determinados elementos descartados juntamente com o resíduo, provenientes das etapas do processo, cuja contaminação apresenta teores semelhantes às ligas utilizadas na fundição das peças (Tabela 2). Conforme varia o teor metálico presente na areia⁽¹⁾ existe uma classificação específica para o resíduo. Por exemplo, teores de chumbo superiores a 1,0 g Pb / kg de resíduo (vide Tabela 3) encontrados na areia transformam o resíduo não-inerte (classe II) em resíduo perigoso (classe I), com custos de descarte da ordem de US\$ 230 / t.

Dessa forma, o custo total mensal gerado por esses resíduo ultrapassam a casa dos US\$27.000, mesmo sem computarmos o custo de um aterro sanitário para um resíduo classe I (com teores acima da norma, conforme descrito na Tabela 3).

Tabela 2: Composição das ligas utilizadas para fundição de metais sanitários.

	BRONZE	LATÃO
Cu (%)	82 - 85	59 - 61
Zn (%)	7 - 9	37 - 38
Pb (%)	5 - 6	2 - 3
Sn (%)	2 - 3	-

Paralelamente a isso, a contaminação da areia com metal inviabiliza qualquer processo de recuperação desse resíduo⁽²⁾.

Os processos de recuperação da areia envolvem 2 fases: recuperação mecânica da areia de moldagem à verde e recuperação térmica de areias de macharia aglomeradas com resina (Shell e Hot-Box)^(2,3,4,5).

Durante a recuperação térmica, o resíduo é aquecido a temperaturas da ordem de 750°C para a queima completa dos aditivos químicos. Nesse patamar de temperatura, a presença de elevados teores de zinco (material muito volátil) e chumbo (cuja presença facilita a usinagem das peças) podem originar efluentes gasosos ainda mais nocivos que o próprio resíduo de areia^(4,6). Portanto, qualquer tentativa de recuperação da areia de fundição envolve, necessariamente, a eliminação ou, pelo menos, a minimização dos teores metálicos presentes na areia.

Tabela 3: Teores metálicos presentes no resíduo de areia.

Elemento	Norma Atual	Projeto de Norma	Material	Volume total	Custo
	(1) (g / kg resíduo)	(1) (g / kg residuo)	descartado (*) (g / kg residuo)	(kg)	aproximado (US\$ / mês)
Cu	-	5,0	27	5.400	12.960
Zn	-	10,0	2	400	624
Pb	1,0	2,0	2	400	252

(*) Partículas de bronze, latão, granulhas de aço e areia.

2. OBJETIVOS

Constituem-se nos principais objetivos desse trabalho:

- ⇒ Detectar todos os pontos geradores de contaminação e propor alternativas para sua eliminação;
- ⇒ Estudar o processo de jateamento das peças moldadas em areia à verde, buscando alternativas para otimização dos parâmetros de controle; e,
- ⇒ Pesquisar processos e equipamentos para a separação da contaminação metálica nos resíduos de areia de fundição, de forma a enquadrar esse resíduo dentro da classificação de classe II.

Com base nesses objetivos principais criar-se-á conhecimentos técnicos para uma análise mais aprofundada de equipamentos para recuperação da areia de fundição (reciclagem do resíduo) e, também, desenvolvimentos de novos processos, sobretudo na macharia, que possibilitem minimizar o volume de areia gerado.

3. FASES DO PROCESSO

O processo de fabricação dos metais sanitários inicia-se com a fundição de válvulas e registros, conforme descrito a seguir e representado na Figura 1.

3.1. MACHARIA

A fabricação dos machos é feita pelo processo Shell, onde areia e resina misturadas (areia coberta) são injetadas num molde e curadas pela ação de queimadores a gás. Após o vazamento de metal nos moldes, parte desses machos permanecem no interior das peças.

3.2. MOLDAGEM

Os moldes são confeccionados em areia à verde, numa mistura formada por areia (do mar ou de mina), bentonita, mogul (pré-gelatinado de milho), carvão e serragem. Após o vazamento, os moldes são quebrados e a areia de moldagem retorna para o Sistema de Areias.

As peças desmoldadas se encontram impregnadas com resíduos de areia de moldagem, além de conter restos de macho em seu interior.

3.3 JATEAMENTO

A limpeza das peças é feita em máquinas jateadoras utilizando a força centrífuga de uma turbina para arremessar um abrasivo (granulhas metálicas) sobre as peças. A ação dessas granulhas remove toda a areia de moldagem da superfície das peças, todo o resto dos machos no interior das peças e, ainda, promove um padrão de acabamento para as peças.

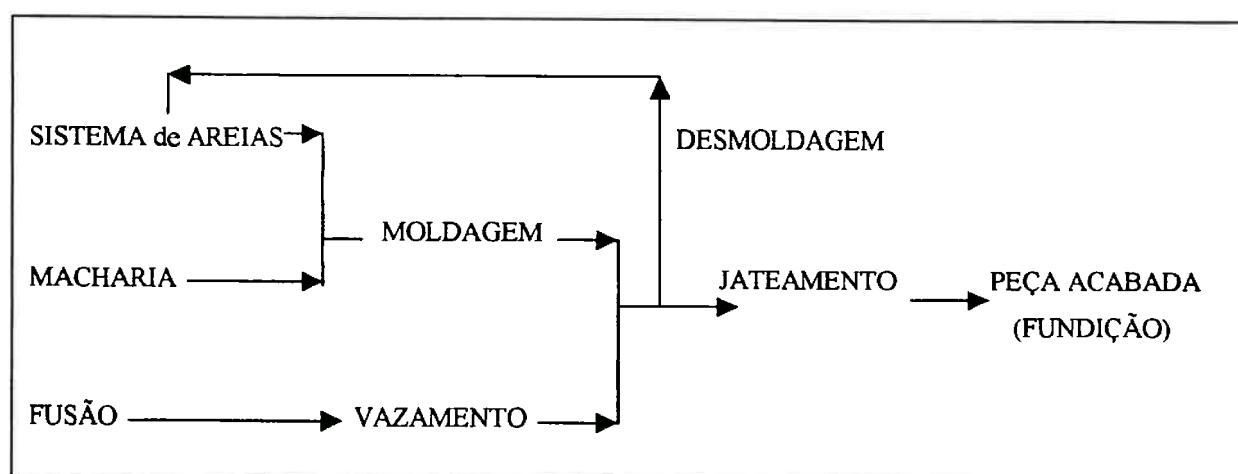


Figura 1: Fluxograma do processo.

4. PONTOS DE CONTAMINAÇÃO

Os principais pontos geradores de resíduos metálicos na areia de fundição, representados na Figura 2, são:

4.1. RETORNO DA AREIA DE MOLDAGEM

Enquanto o molde permanece no “shake-out” (grelha vibratória), a areia escoa pela peneira juntamente com respingos e rebarbas arrancadas das peças. Esses resíduos metálicos, em contato com a areia abrasiva, são reduzidos a partículas muito finas de granulometria semelhante a areia original (módulo 80-100 AFS).

A análise química da areia de retorno é descrita a seguir:

$$\text{Cu} = 5,2 \text{ g/kg areia}$$

$$\text{Zn} = 0,5 \text{ g/kg areia}$$

$$\text{Pb} = 0,4 \text{ g/kg areia}$$

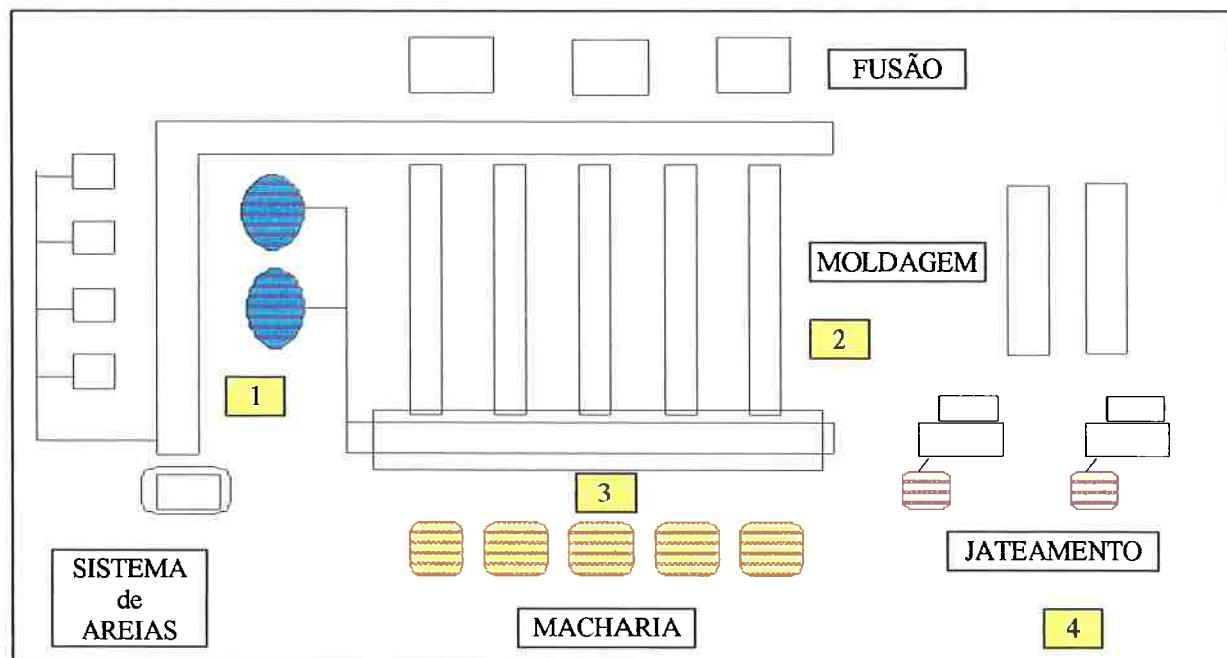


Figura 2: Arranjo físico dos principais pontos geradores de resíduo.

Legenda

1	Retorno da areia de moldagem
2	Respingos e Varreduras
3	Areia de Macharia Shell
4	Jateadoras de granalha

4.2. RESPINGOS

Os respingos são partes metálicas de maior volume (em relação às rebarbas presentes na areia de retorno) e que não são captadas pelo sistema de retorno da areia. Essas partes metálicas estão contaminadas com areia, sendo necessário um peneiramento desse metal, resultando em material a ser fundido e areia para descarte. O teor metálico presente nessa areia é:

$$\text{Cu} = 4,8 \text{ g/kg areia}$$

$$\text{Zn} = 0,3 \text{ g/kg areia}$$

$$\text{Pb} = 0,2 \text{ g/kg areia}$$

4.3. AREIA SHELL

Outro ponto gerador de contaminação da areia ocorre nos machos refugados da macharia. Como não existe contato dessa areia com metal, o nível de contaminação metálica desse resíduo é praticamente zero.

4.4. JATEAMENTO

Durante o jateamento das peças, as granulhas de aço removem restos de areia de moldagem na superfície das peças e pedaços de macho do interior das peças. Devido à ação das granulhas, sobretudo no fim do jateamento, partículas metálicas da superfície são removidas, de forma a se obter um padrão de cor pré-estabelecido em cada peça.

O teor metálico presente nessa areia é:

$$\text{Cu} = 27,3 \text{ g/kg areia}$$

$$\text{Zn} = 2,09 \text{ g/kg areia}$$

$$\text{Pb} = 2,17 \text{ g/kg areia}$$

5. JATEAMENTO COM GRANALHAS

O jateamento com granalhas tem por finalidade remover toda a areia presente nas peças fundidas. As principais características desse equipamento (Figura 3) estão descritas a seguir, embora a numeração dos itens do equipamento referem-se à Figura 7.

5.1. EQUIPAMENTO

O equipamento destinado ao jateamento das peças fundidas foi projetado para efetuar a limpeza das peças pela ação conjunta de um mecanismo de esteiras metálicas, de uma turbina e de um sistema de recirculação dos abrasivos, os quais garantem a exposição de toda a peça ao jato de granalha e sua completa limpeza.

São constituintes do equipamento:

- Turbina (1)

Serve para arremessar os abrasivos sobre as peças utilizando a força centrífuga. Na parte central da turbina encontra-se a caixa de controle contendo aberturas que permitem a passagem do abrasivo para as palhetas. Essa caixa de controle é ajustável, permitindo direcionar o jato de abrasivo. Pormenores desse sistema são apresentados na Figura 4.

- Sistema de recuperação e recirculação de abrasivo

As granalhas arremessadas pela turbina são limpas e recuperadas, retornando ao silo de estocagem superior, através dos seguintes sistemas:

- Silo de recuperação inferior (8, 9)

O abrasivo arremessado pela turbina cai por gravidade através dos furos para drenagem da esteira transportadora. Uma grade protetora é montada sobre o silo de recuperação inferior de forma a prevenir a passagem de objetos grandes até a rosca transportadora, a qual transfere o abrasivo até a seção inferior do elevador de canecas.

- Cabine de jateamento (5, 6)

A cabine de jateamento serve para limitar o campo de ação do abrasivo (granalha) arremessado, de forma a se obter o máximo aproveitamento da velocidade da granalha e possibilitar a sua reutilização.

- Esteira transportadora (2)

Constitui-se de uma esteira metálica com furos para drenagem, cujo acionamento é feito por rolos montados sobre rolamentos anti-fricção. Um dos rolos possui um dispositivo que o mantém tensionado.

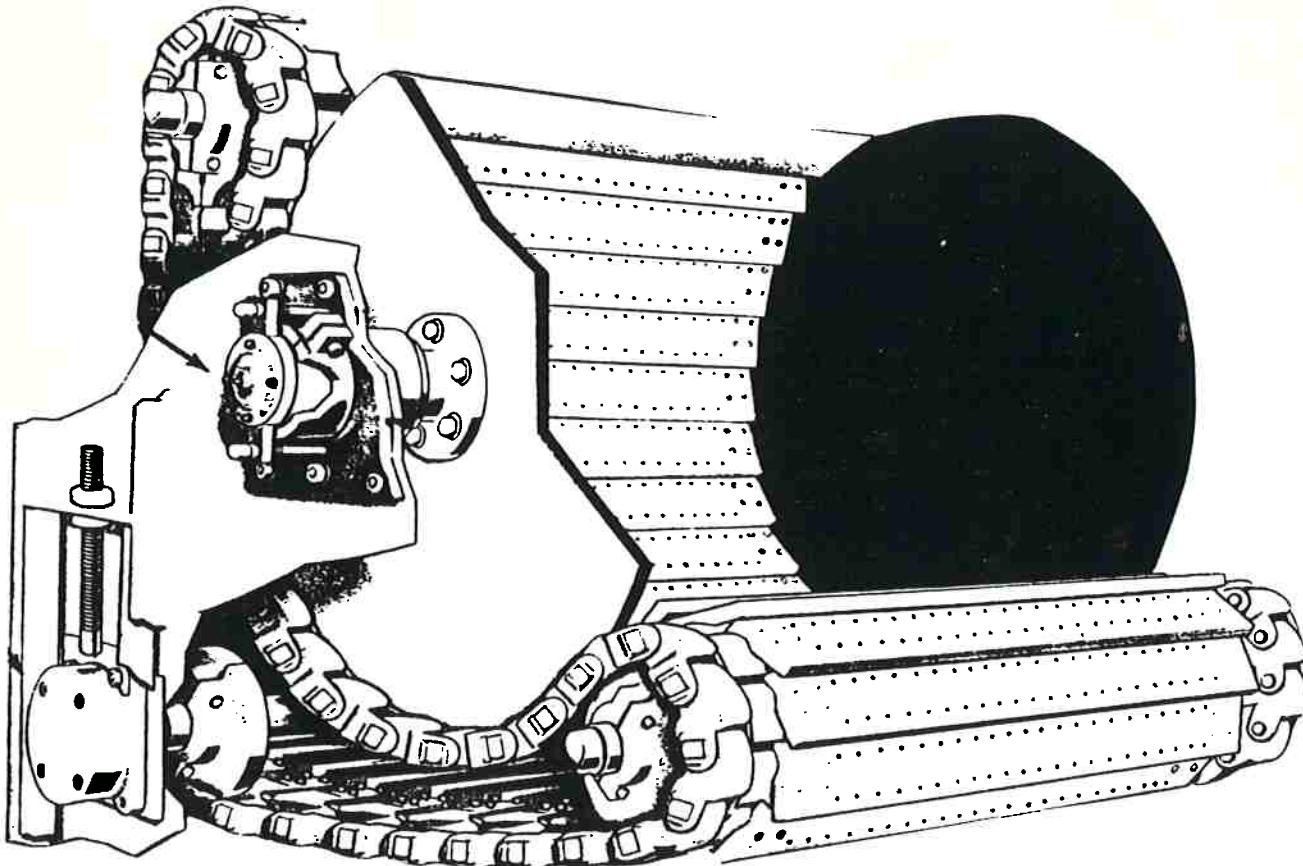


Figura 3: Esteira transportadora e cabine de jateamento.

- Elevador de canecas (10)

Canecas presas numa correia transferem o abrasivo contaminado com areia para a seção superior do equipamento (separador) utilizando o princípio de descarga centrífuga.

- Separador (12)

A separação da areia residual e da granulha é feita por um separador do tipo lavagem por corrente de ar. Um dosador distribui o material a ser separado, formando uma cortina com granulha e areia. Os contaminantes de baixa densidade são carregados pela ação do fluxo de ar em contra-corrente, enquanto que o abrasivo retorna ao silo de armazenamento.

- Sistema de exaustão (11)

O coletor de pó é responsável pelo fornecimento de ar na quantidade necessária para a ventilação do equipamento e a “lavagem” da mistura de abrasivo e areia (contaminante). O pó é retirado periodicamente dos elementos filtrantes por meio de pulsos automáticos de ar comprimido, sendo descartado posteriormente.

- Válvula de controle de granalhas (1)

Uma válvula corrediça regula o fluxo de abrasivo para a turbina, permitindo o controle exato da quantidade de granalha que deve ser adicionada às palhetas.

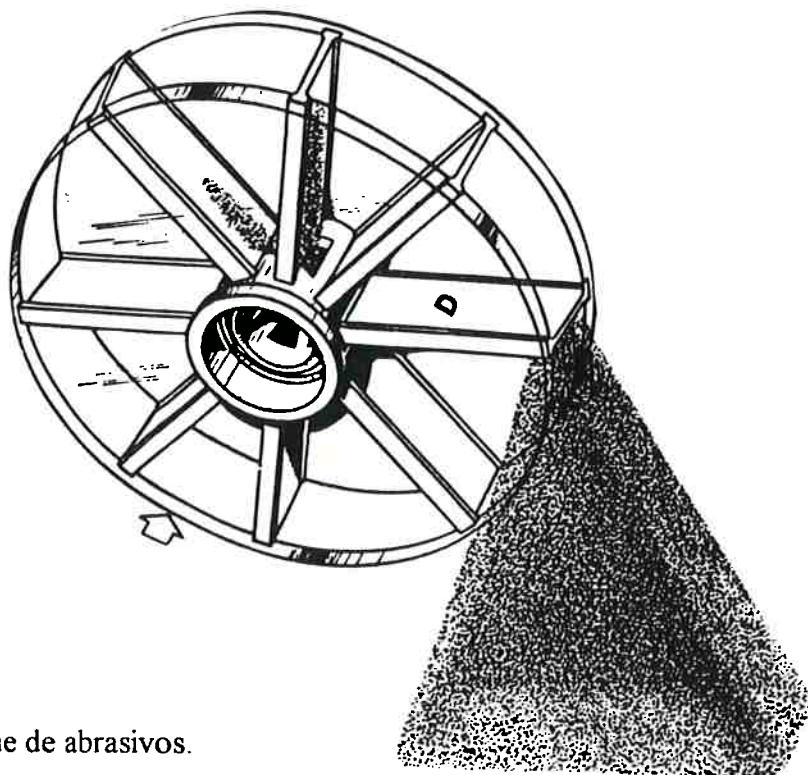


Figura 4: Turbina, palhetas e o leque de abrasivos.

5.2. PARÂMETROS DO PROCESSO DE JATEAMENTO

Dentre as variáveis de controle do processo, podemos destacar:

- volume de material a ser jateado;
- tempos de processamento das cargas; e,
- tipo de abrasivo (granalha) utilizado.

A influência do tempo de processamento na contaminação metálica da areia é lógica: quanto maior o tempo de jateamento, maior será a remoção de partículas metálicas das peças jateadas. Portanto, os tempos de processamento das carga devem ser minimizados.

Outro aspecto a considerar é o volume de material que ingressa no equipamento. Existe um volume ideal de carga a ser processada. Pequenas cargas, embora necessitem de um tempo de jateamento pequeno, são inviáveis tanto do ponto de vista da produção quanto do ponto de vista do desgaste do equipamento, uma vez que o material carregado, isto é, a própria carga, serve como proteção das partes constituintes do equipamento, conforme descrito na Figura 5. Do ponto de vista do tipo de abrasivo utilizado, são três os fatores que devem ser considerados para se obter uma maximização de rendimento do equipamento:

- evolução da limpeza ao longo do tempo: em quanto tempo as peças apresentam um acabamento superficial adequado;
- qualidade final da limpeza: qual é o grau de acabamento necessário às peças (superfície adequada); e,
- custos e produtividade do equipamento: quanto de material é possível jatear por carga de maneira que o equipamento apresente o menor desgaste possível.

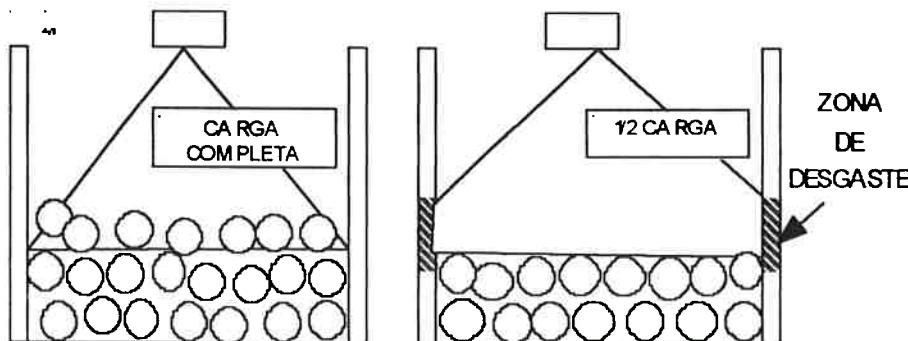


Figura 5: Influência do volume de carga no desgaste do equipamento.

Este desempenho é determinado pelas características de quebra do abrasivo, pela distribuição do tamanho das granulhas e, finalmente, pela dureza do abrasivo (seleção de material).

Um ponto muito importante é a geometria do abrasivo. As granulhas devem se apresentar esféricas de maneira que possam abranger uma área máxima da peça e de maneira homogênea. Granulhas angulares (em forma de agulhas) removem muito metal das peças (contaminando ainda mais a areia de descarte) e de maneira extremamente localizada (pequena abrangência), requerendo maiores tempos de processamento⁽⁷⁾.

No esquema A da Figura 6, granulhas grandes provocam um excessivo desgaste superficial nas peças através da remoção de grandes volumes de metal. No esquema B, a remoção de material é mínima, mas a abrangência das granulhas também é muito pequena, necessitando de elevados tempos de jateamento. No esquema C (condição ideal, mix de granulhas balanceado), a mistura de diferentes tamanhos de abrasivo apresentam uma condição ideal para a operação devido ao equilíbrio entre a remoção de metal da superfície e a abrangência dos abrasivos.

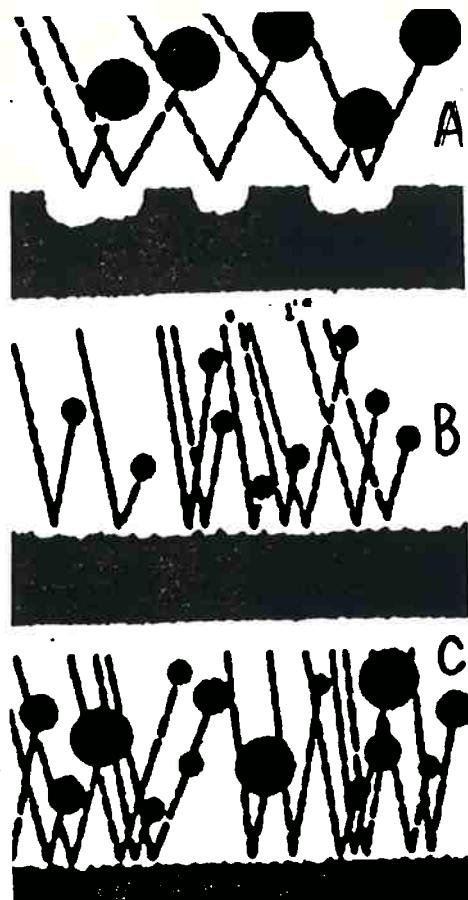


Figura 6: Influência do tamanho das granulhas na eficiência do jateamento.

A distribuição dos tamanhos das partículas está diretamente relacionada às características de quebra das granulhas. É importante que as granulhas permaneçam sempre esféricas e com uma faixa de distribuição de tamanhos variados. As maiores granulhas provocam um desbaste maior na superfície, enquanto que as menores granulhas causam pouco impacto na superfície das peças. Um mix ideal de granulhas compõe-se da combinação de granulhas grandes, médias e pequenas (vide Figura 6), balanceando a capacidade de remoção de material sobre toda a superfície das peças.⁽⁷⁾

A dureza do abrasivo, embora muito importante, torna-se secundária face à característica que o abrasivo deve apresentar de não sofrer desgaste excessivo.

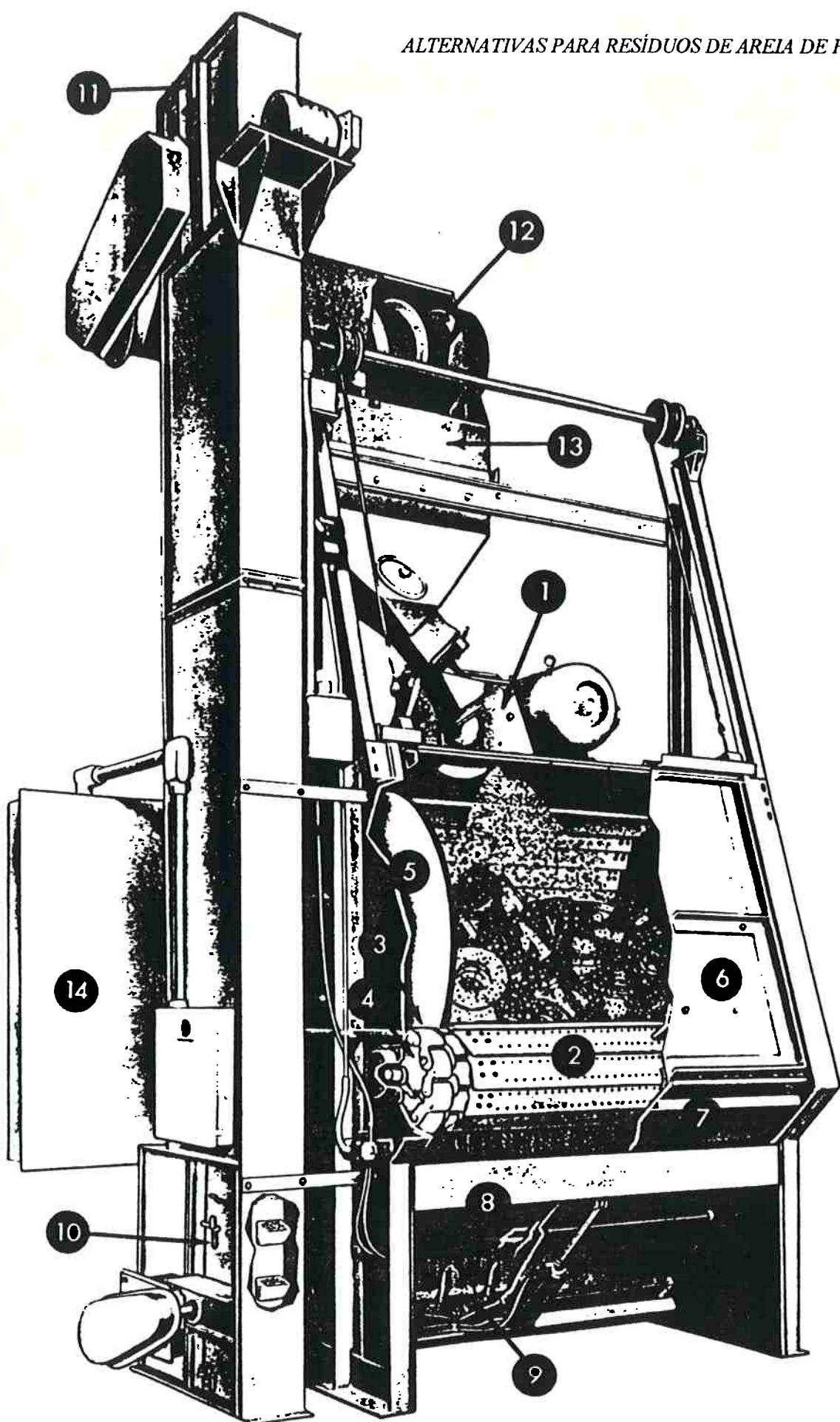


Figura 7: Equipamento utilizado para o jateamento das peças.

6. PARTE EXPERIMENTAL

As experiências foram realizadas no Laboratório de Tratamento de Minérios da Universidade de São Paulo (mesa vibratória e separação eletrostática) e no Laboratório de Areias da Duratex (ensaios granulométricos). Para as análises químicas utilizou-se um espectrômetro de absorção atômica.

6.1. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

Mesmo conhecendo-se o mecanismo de contaminação metálica da areia (desgaste superficial pela ação de granulhas e pela abrasão de areias), a caracterização do resíduo sob o ponto de vista químico (análise química) e físico (granulometria) é fundamental para se alcançar os objetivos propostos.

6.1.1. ANÁLISE QUÍMICA

Inicialmente analisou-se cada ponto de contaminação metálica da areia e o resultado está apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Análise química de cada ponto de geração de resíduo.

	Cu (g / kg)	Zn (g / kg)	Pb (g / kg)
Areia de moldagem (retorno)	5,2	4,6	0,4
Varredura	4,8	4,2	0,2
Areia Shell (macharia)	0,1	0,1	-
Jateadora	9,9	9,7	3,4

6.1.2. ENSAIO GRANULOMÉTRICO

Embora boa parte do resíduo de areia apresente-se extremamente fino, o teor de partículas metálicas presentes na areia mantém-se praticamente constante, conforme descrito na Tabela 5, inviabilizando a concentração de metal por peneiramento simples.

Tabela 5: Distribuição granulométrica da areia contaminada captado nas jateadoras.

Peneira (ABNT)	Resíduo (%)	Cu (g / kg)	Zn (g / kg)	Pb (g / kg)
70	-	-	-	-
100	13	10,1	9,0	2,5
140	25	9,8	9,7	2,9
200	16	9,9	9,2	3,2
270	28	9,1	9,1	3,5
> 270	18	9,8	9,6	3,1

6.2. VARIÁVEIS DO PROCESSO

As principais variáveis do processo são o volume das cargas por operação e o tempo de jateamento das peças. As experiências descritas a seguir apresentam essas variáveis.

6.2.1. VOLUME DAS CARGAS

Para se avaliar a influência do volume das cargas trabalhou-se com dois extremos: cargas completas e cargas parciais (1/2 carga), conforme descrito nas Figuras 8 e 9. A Tabela 6 apresenta a influência do tempo de jateamento sobre a qualidade superficial das peças quando se utiliza uma carga completa (900 kg) na jateadora.

Tabela 6: Evolução do acabamento superficial das peças em função do tempo de jateamento (carga completa - equivalente a 900 kg).

Tempo de jateamento (min)	acabamento superficial		
	areia de moldagem resíduos	areia de macho inteiros	(padrão de cor)
5			ruim
10	parcialmente limpo	resto	ruim
15	limpo	resto	regular
20	limpo	isento	médio
25	limpo	isento	bom
30	limpo	isento	muito bom
35	limpo	isento	excelente



Figura 8: Jateamento de peças com carga completa.

A Tabela 7 apresenta a influência do tempo de jateamento sobre a qualidade superficial das peças quando se utiliza uma carga incompleta (450 kg) na jateadora.

Tabela 7: Evolução do acabamento superficial das peças em função do tempo de jateamento
(1/2 carga - equivalente a 450 kg).

Tempo de jateamento (min)	acabamento superficial		
	areia de moldagem	areia de macho	(padrão de cor)
3	parcialmente limpo	resto	ruim
6	limpo	resto	regular
9	limpo	isento	médio
12	limpo	isento	muito bom
15	limpo	isento	excelente



Figura 9: Jateamento das peças com carga parcial (1/2 carga).

6.2.2. TEMPO DAS CARGAS

Em 3 cargas sucessivas avaliou-se o grau de contaminação metálica da areia em função do tempo de jateamento. As médias obtidas estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8: Análise química em função do tempo de processamento das peças nas jateadoras.

Tempo de jateamento (min)	Cu (g / kg)	Zn (g / kg)	Pb (g / kg)
3	1,5	0,3	-
6	2,5	0,8	0,5
9	3,1	1,7	0,9
12	4,9	2,6	1,2
15	7,6	4,4	1,9
20	9,9	6,1	2,2
25	10,5	7,6	3,5
30	11,2	8,9	3,9

6.3. TRATAMENTO DO RESÍDUO

Buscando separar o metal da areia levantou-se duas possibilidades: separação por diferença de densidade (mesa vibratória) e separação por diferença de condutibilidade elétrica (separador eletrostático).

6.3.1. ENSAIO COM MESA VIBRATÓRIA

Parte do resíduo de areia foi processado em mesa vibratória. Esse tipo de equipamento, largamente utilizado em mineração, normalmente apresenta resultados excelentes. Consiste de uma mesa parcialmente inclinada e capaz de vibrar. O material a ser separado, alimentado por uma calha vibratória, recebe um jato de água que o espalha pela superfície da mesa. As partículas mais pesadas (mais densas) percorrem a mesa longitudinalmente, sendo coletadas em pontos mais abaixo que as demais partículas (vide Figura 10).

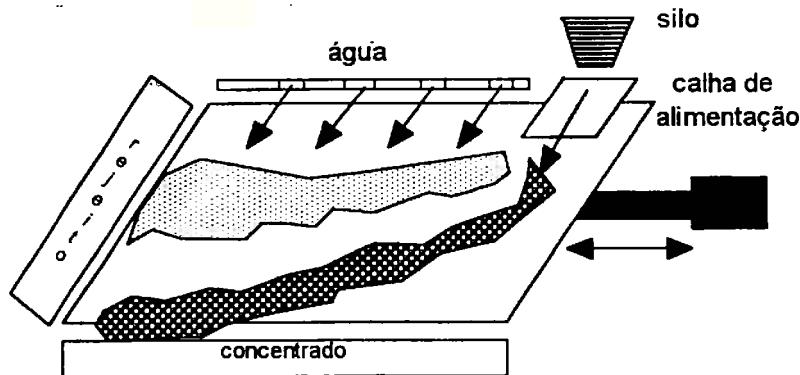


Figura 10: Funcionamento da mesa vibratória.

Os parâmetros utilizados no ensaio com mesa vibratória (Figura 11) foram os seguintes:

- amplitude: 1,15 cm;
- freqüência (motor): 60 Hz;
- ângulo de inclinação: $\sim 2^\circ$;
- velocidade de alimentação: 321 g / min (total: 1605 g);
- volume de água: 16,32 l / min (total: 81,60 l); e,
- tempo de ensaio: 5 min.



Figura 11: Mesa vibratória.

6.3.2. SEPARADOR ELETROSTÁTICO

Este tipo de equipamento é utilizado para separar materiais que apresentem diferentes condutibilidades elétricas. Uma combinação entre atração e repulsão às forças eletrostáticas produz uma seletiva separação de uma variedades de materiais, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9: Materiais com potencial de separação em equipamento eletrostático.

Não-condutores	Condutores
Apatita, Calcita, Gipsita, Scheelita	Cassiterita, Rutilo, Wolfranita, Ouro e Prata
Feldspato, Quartzo, Zirconita	Hematita, Magnetita, Galena, Piritita
Plásticos, borrachas e carcaças de circuitos	fios de Cu-Al, equipamentos eletrônicos

O princípio de funcionamento desse equipamento é descrito na Figura 12. Uma calha vibratória alimenta o material sobre um rotor de aço inox finamente polido. Os eletrodos (de ionização e estático) criam um campo elétrico, gerando carga elétrica nas partículas alimentadas.

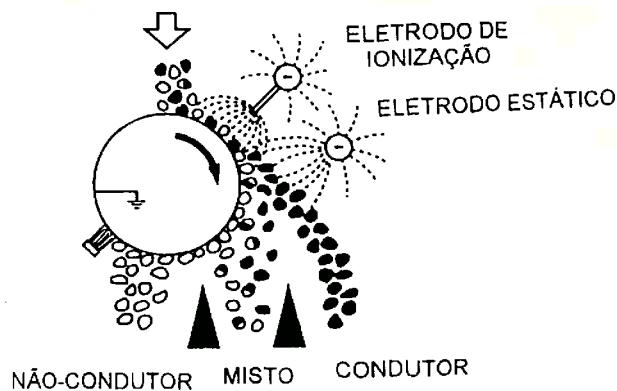


Figura 12: Esquema de funcionamento do separador eletrostático.

As partículas de material condutor são capazes de dissipar a carga elétrica, ficando exclusivamente sob a ação da força centrífuga exercida pelo rotor. As partículas de material não-condutor, uma vez que não conseguem dissipar a carga elétrica, são atraídas pelo rotor que possui polaridade invertida em relação às cargas induzidas nas partículas. Num ponto intermediário, coleta-se um material misto, isto é, com partículas parcialmente condutoras. A Figura 13 apresenta o aparelho de separação eletrostática.

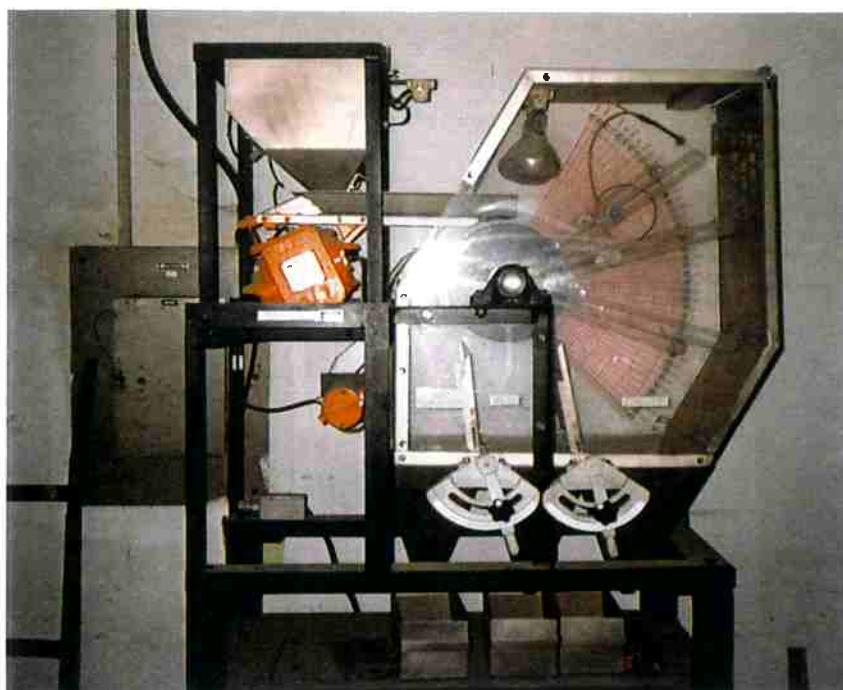


Figura 13: Separador eletrostático.

A eficiência do equipamento está diretamente vinculada ao produto a ser processado, sobretudo ao tamanho da partícula, trabalhando-se de maneira mais eficaz com partículas inferiores a 200 malhas por polegada linear.

Como a condutividade dos materiais pode ser influenciada pela temperatura, pelo grau de impureza do material e pelo grau de liberação das partículas, é necessário que a caracterização do material seja muito precisa.

As principais variáveis do equipamento são:

- volume de alimentação (calha vibratória);
- velocidade do rotor (rotação);
- tensão de alimentação;
- tipos e posições ocupadas pelos eletrodos; e,
- inclinação dos defletores.

Os parâmetros utilizados no ensaio estão descritos na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros utilizados no ensaio com separador eletrostático.

Ensaio	Tensão (kV)	Rotor (rpm)	Defletores (grau)	Eletrodos (grau)	Observações
1	30	70	45 / 45	80 / 60	-
2	30	70	15 / 15	80 / 60	-
3	40	105	0 / 0	80 / 60	desarme devido à elevada tensão
4	36	105	0 / 0	80 / 60	-
5	36	97	0 / 15	80 / 60	alimentação mais lenta
6	36	97	0 / 15	80 / 40	aproximação do eletrodo inferior
7	36	97	0 / 45	80 / 40	aproximação do eletrodo inferior
8	36	97	0 / 45	80 / 40	aproximação dos 2 eletrodos/desarme
9	36	97	0 / 45	80 / 40	afastamento do eletrodo superior
10	42	97	0 / 30	60 / 40	afastamento do eletrodo superior

7. RESULTADOS

Das duas linhas de atuação propostas (acompanhamento do processo para minimizar a geração de resíduo e desenvolvimento de ensaios para recuperar esse metal contido na areia), os resultados encontrados foram os seguintes:

7.1. JATEADORA

De maneira a se obter um melhor rendimento do equipamento, e, por conseguinte, minimizar os tempos de jateamento e a inclusão de partículas metálicas na areia residual, passou-se a atuar mais rigorosamente nas variáveis do processo. As principais variáveis do processo são o volume das cargas e o tempo de processamento destas. Do ponto de vista da operação, detectou-se a ausência de um procedimento único para a operação de jateamento: cargas com diferentes volumes de metal eram processadas em tempos similares.

Além disso, peças recolhidas durante a produção com a finalidade de servirem como amostras em tempo real passam por duas etapas de jateamento: uma para análise da produção e outra para se obter o padrão de cor determinado.

A análise de alguns dos principais pontos de contaminação da areia de fundição permitiu constatar-se algumas não-conformidades na operação de jateamento, das quais destacam-se:

- peças de grande importância para o funcionamento do equipamento estavam avariadas, como as peneiras de separação areia/ metal;
- existência de um sistema de exaustão centralizado para todas as máquinas com capacidade de exaustão limitada, inviabilizando uma exaustão eficiente quando as 4 máquinas operam conjuntamente;
- desligamento automático do sistema de exaustão (vinculado com o funcionamento da turbina da jateadora), de maneira que o equipamento permanece circulando areia e granulhas sem poder de exaustão (vide Figura 14). Essa quantidade de areia que circula pelo equipamento compromete extremamente a vida útil dos principais componentes da jateadora, como as palhetas e a própria turbina;
- ausência de um timer para padronizar os tempos de jateamento, uma vez que os volumes de carga e as características das peças apresentam particularidades quanto ao tempo de exposição ao jato de granulha; e,

- vazamento de óleo junto à turbina e ao elevador de canecas, entre outras não conformidades de âmbito geral, mas que contribuem demais para perdas no rendimento do equipamento.

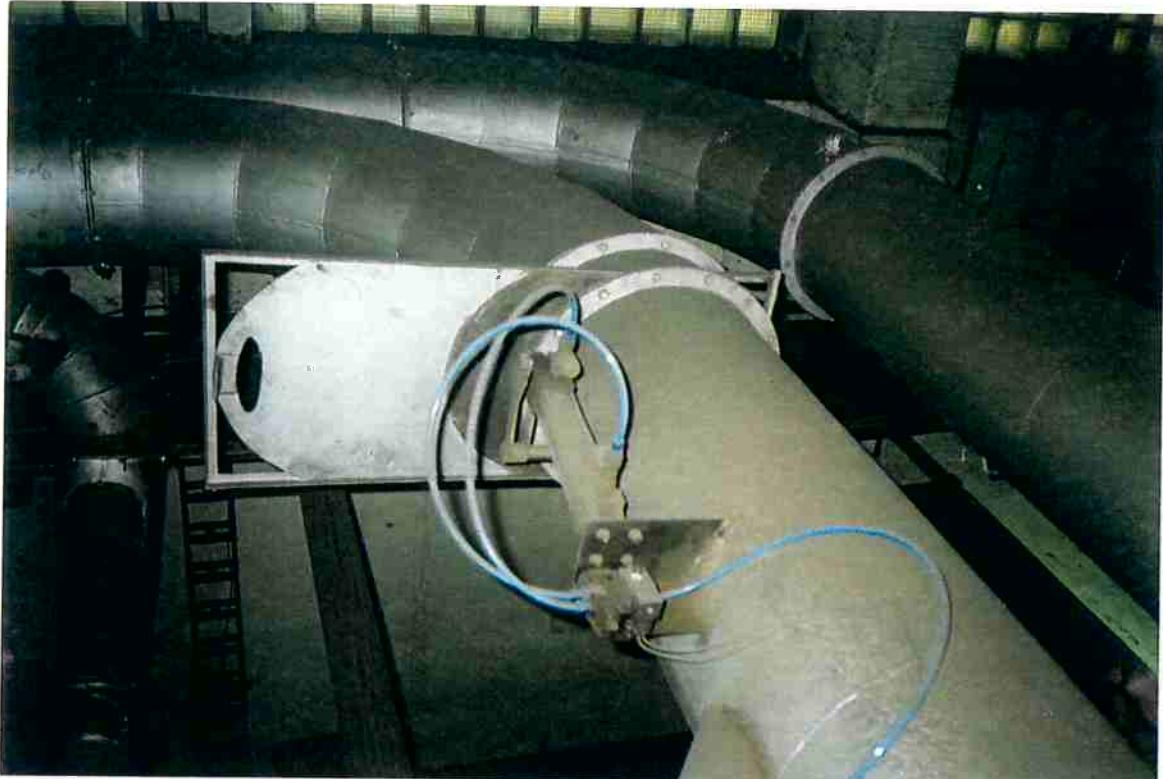


Figura 14: Pormenores do desligamento automático do sistema de exaustão.

7.2. ENSAIOS

Do ponto de vista dos ensaios realizados, os resultados estão descritos a seguir.

7.2.1. ENSAIO COM MESA VIBRATÓRIA

Os ensaios em mesa vibratória apresentaram excelente grau de eficiência do ponto de vista de se permanecer com um resíduo classe II.

Tabela 11: Análise química dos produtos obtidos no ensaio com mesa vibratória.

Amostra	Cu (g / kg)	Zn (g / kg)	Pb (g / kg)
Concentrado 1º	1,5	0,3	-
Concentrado 2º	2,5	0,8	0,5
Rejeito	112,0	18,9	13,9

7.2.2. SEPARADOR ELETROSTÁTICO

Os resultados obtidos nos testes realizados no equipamento de separação eletrostática apresentaram excelente desempenho do ponto de vista do material não-condutor (areia), isto é, da extração de metal da areia. O grau de contaminação metálica da areia reduziu-se a valores muito abaixo da norma atual e, também, em relação ao projeto de norma que logo deverá entrar em vigor.

Do ponto de vista da concentração metálica, esperava-se que o resíduo recuperado fosse capaz de ser alimentado diretamente em fornos de fusão. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 12 e na Figura 15.

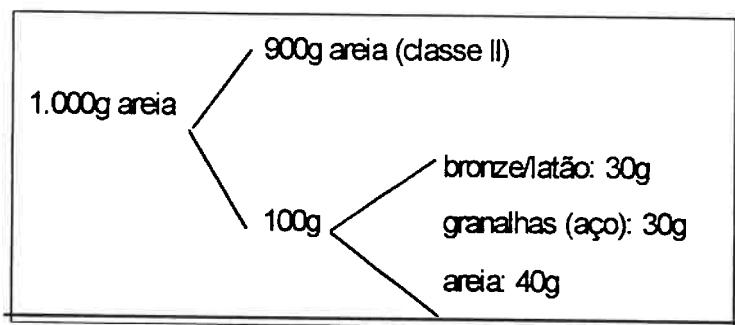


Figura 15: Balanço de massa do resíduo processado.

Tabela 12: Resultados do processamento do resíduo de areia no separador eletrostático.

(g metal / kg de resíduo)		Cu	Zn	Pb
não-condutor	min.	0,3	traços	traços
(areia)	máx.	0,5	0,04	0,01
misto	min.	7,0	1,0	0,6
(metal + areia)	máx.	14,3	8,2	4,0
condutor	min.	121,0	18,0	15,0
(metal)	máx.	147,0	34,0	27,0

8. DISCUSSÃO

A seguir é apresentada a discussão relativa aos resultados e às observações sobre o funcionamento do equipamento utilizado no processo de jateamento.

8.1. JATEADORA

Apesar de dispor de uma tecnologia muito antiga (anterior a 1969), não houveram grandes inovações técnicas nos equipamentos de jateamento.

Esses equipamento apresentam excelente desempenho do ponto de vista do acabamento superficial obtido nas peças. No entanto, a nível de automação, esses equipamentos apresentam-se sem alternativas para aplicações em linhas contínuas, razão pela qual constituem-se em pontos de futuros gargalos de produção.

Outro ponto negativo desse tipo de equipamento, são as constantes manutenções requeridas. Sob esse aspecto, o custo dessas operações e a necessidade freqüente de se parar o equipamento para trocas de peças (com uma consequente perda de produtividade), constituem-se em pontos de constante observação por parte da Área Administrativa.

O acompanhamento do processo de jateamento possibilitou a constatação de alguns pontos de não-conformidade no funcionamento do equipamento. Dentre as observações, pode-se dizer que o sistema de exaustão do equipamento é o grande responsável pelas ocorrências de manutenção. A ausência de um timer para o controle dos tempos de processamento das cargas, a existência de um sistema único de exaustão para todas as máquinas e o desligamento automático do sistema de exaustão causam uma ineficiência na operação, permanecendo grandes quantidades de areia no interior do equipamento, contribuindo para um desgaste mais expressivo nas peças da jateadora.

Confrontando-se essas observações com informações do fabricante (“0,2% de areia circulando no equipamento provoca um desgaste de peças da ordem de 80%”) ⁽¹⁰⁾, comprovou-se que era possível otimizar o funcionamento do equipamento, ganhando-se em produtividade (menores tempos de processamento), minimizando os teores metálicos na areia e reduzindo gastos de manutenção.

A importância de se ter um sistema de exaustão específico para cada máquina decorre da dificuldade de se dimensionar um sistema de exaustão adequado para todas as máquinas a um custo compatível. Com isso, verificou-se que o sistema de exaustão atual não comporta uma operação conjunta de todas as jateadoras.

Quanto ao desligamento do sistema de exaustão, constatou-se que, mesmo terminado o ciclo da jateadora, ainda havia muita areia circulando no equipamento. Essa areia no interior da máquina provoca o desgaste excessivo de peças. A solução proposta para isso foi a eliminação desse sistema de controle, permanecendo o equipamento com poder de exaustão contínuo, mesmo entre ciclos de produção.

8.2. ENSAIOS

Para se recuperar o metal contido na areia, as alternativas propostas apresentaram excelente potencial, conforme descrito a seguir.

8.2.1. ENSAIO COM MESA VIBRATÓRIA

Uma análise mais cuidadosa da Tabela 11 permite concluir a eficiência desse tipo de equipamento. Tanto o concentrado primário, como o concentrado secundário constituem-se de areia com teores metálicos abaixo dos limites estabelecidos em norma. Da mesma forma, o rejeito obtido constituía-se de altos teores metálicos com possibilidades de reprocessamento.

Dentre as variáveis de controle do equipamento, o ângulo de inclinação apresentou-se como a variável mais importante na eficiência de separação. Qualquer valor superior ao utilizado, causava uma perda de eficiência na separação, mesmo para pequenas variações nesse parâmetro. As demais variáveis pouca influência exercearam na qualidade dos produtos obtidos, variando-se apenas o local de captação do rejeito.

Embora apresente excelentes resultados, o processamento do resíduo em mesa vibratória tornar-se-ia extremamente difícil devido ao volume de água utilizado no processo, mesmo que se operasse em circuito fechado. Para se ter uma idéia, para se processar pouco mais de 1,5 kg foi consumido um volume de água superior a 80 litros.

No entanto, o principal problema desse equipamento constitui-se nos produtos gerados: rejeito e concentrado completamente úmidos. Se parte dos objetivos for a recuperação do metal contido no resíduo, esse processo implica necessariamente numa planta de secagem desse resíduo.

A areia destinada ao descarte também apresenta inconvenientes provocados pelo excesso de umidade. Um fator muito importante refere-se a custos de transporte do resíduo. A presença de 1 kg de água no resíduo implicaria em aumentos significativos no custo do transporte. Por fim, a umidade presente no resíduo inviabilizaria o aterro direto desse material.

devido a problemas com impermeabilização das valas, necessitando de um tratamento prévio para poder se enquadrar às condições do aterro.

Portanto, o processamento por via úmida apresentou excelentes resultados em termos de separação, mas a qualidade dos produtos obtidos implicariam em dispendiosas etapas de processamento posterior.

8.2.2. SEPARADOR ELETROSTÁTICO

Os parâmetros do equipamento foram analisados em função dos resultados de análise química obtidos. Pode-se afirmar que trabalhando-se a tensões na faixa de 30 kV e 40 kV, obtém-se melhores resultados quando se opera sob elevadas tensões (próximas de 40 kV). Sob baixas tensões a separação é ineficaz e à tensões superiores a 40 kV o equipamento fica sujeito a descargas elétricas constantes, atrapalhando a separação.

Outra variável importante é a velocidade do rotor. As partículas condutoras serão arremessadas segundo a força centrípeta provocada pelo rotor. Dessa forma, velocidades de rotação muito baixas, além de diminuir a produtividade do equipamento, causam perdas no rendimento da separação. Outro ponto a ser considerado é que as partículas condutoras são fortemente arremessadas contra a parede do equipamento num ponto muito acima do anteparo (defletor). Mesmo que os defletores sejam regulados a 0° (ângulo mínimo), não se consegue captar seletivamente as partículas metálicas devido às próprias limitações do equipamento (altura do defletor e ângulo de captação). Em decorrência disso, um ajuste na altura dos defletores possibilitaria uma captação mais seletiva do metal.

De acordo com o balanço de massa do sistema (descrito na Figura 15), embora o volume de “resíduo metálico” (condutor) gerado atendesse às expectativas (inferior a 10% do total do resíduo processado), a contaminação do metal com areia era visual, não possibilitando, ainda, a fusão dessa matéria-prima.

Diferentemente do processo por mesa vibratória, a separação eletrostática é um processo com excelente potencial de aplicação. A premissa inicial de se obter um resíduo de areia classe II foi facilmente comprovada.

Uma possibilidade de se melhorar a qualidade do resíduo metálico pode ser encontrada associando-se uma separação magnética com potentes ímãs de Terras Raras antes do separador eletrostático. Isso possibilitaria eliminar as partículas fortemente magnéticas (como as granulhas de aço), melhorando-se a eficiência do separador eletrostático em decorrência de uma regularidade maior na condutibilidade das partículas arremessadas pelo rotor.

9. CONCLUSÃO

Como conclusão do trabalho pode-se dizer que os objetivos propostos foram satisfatoriamente atingidos.

A detecção dos pontos geradores de resíduo, bem como a caracterização do mesmo, desde a análise química até ensaios granulométricos, permitiram focar o trabalho em dois pontos principais: otimizar os parâmetros de jateamento das peças e pesquisar processos e equipamentos que possibilassem a recuperação metálica da areia de fundição.

Em relação ao processo de jateamento foi possível detectar algumas falhas na maneira de se operar os equipamentos, possibilitando a melhoria desses pontos.

Além disso, processos para separação da contaminação metálica nos resíduos foram estudados com grande êxito. tanto na separação por via úmida (mesa vibratória), como no separador eletrostático foi possível classificar o resíduo separado como classe II.

O desafio presente restringe-se a obter um resíduo metálico com possibilidades de processamento em fundição. Uma possibilidade para isso poderia ser a introdução de imãs potentes (de terras raras, por exemplo) antecipando o separador eletrostático, minimizando o teor de areia a ser processada e melhorando o rendimento do equipamento.

10. BIBLIOGRAFIA

1. Normas ABNT NBR 10.004, set/87 - Resíduos Sólidos;
 NBR 10.005, set/87 - Lixiviação de Resíduos;
 NBR 10.006, set/87 - Solubilização de Resíduos;
 NBR 10.007, set/87 - Amostragem de Resíduos;
 NBR 12.988, set/93 - Líquidos livres - Verificação em amostra de resíduos;
 Projeto de Norma, PN - 1:603.03-008;
1. *One problem, three solution from IMF*, Foundry Trade Journal, julho/97, págs. 271 e 272;
2. *Beneficial Sand Reuse: Making it work*, Modern Casting, agosto/94, págs.28-34;
3. *Sistema Svedala Faço de Regeneração Térmica de Areia de Fundição*, Fundição & Matérias-Primas, maio-junho/97, págs. 28-38;
4. *Sand Reclamation 1995: Is it time for you foundry?*, Modern Casting, agosto/95, págs.25-29;
5. *Sand Reclamation Equipment: Users answer the questions*, Modern Casting, agosto/96, págs.22-26;
6. *A vision for spent Foundry sand*, Modern Casting, agosto/95, págs.30-31;
7. *Manual técnico Wheelabrator Super Tumblast*.