

**Universidade de São Paulo
PECE – Programa de Educação Continuada**

Damião Borges Ramos

**CONSIDERAÇÕES SOBRE A RECICLAGEM E
RECUPERAÇÃO DAS LAMAS DE ALTOS FORNOS**

**ESP/SO
2008
R147d**

**São Paulo
2008**

Damião Borges Ramos

**CONSIDERAÇÕES SOBRE A RECICLAGEM E
RECUPERAÇÃO DAS LAMAS DE ALTOS FORNOS**

**Monografia apresentada ao Programa de Educação
Continuada da Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo, para a conclusão de MBA em Siderurgia .**

**Área de Concentração: Metalurgia
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Breda Mourão**

**São Paulo
2008**

FICHA CATALOGRÁFICA

DEDICATÓRIA

Aos meus filhos Rubem e André, sempre e para sempre.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcelo Breda Mourão por sua orientação paciente, porém, firme.

Aos amigos Engenheiros Dr. Antônio Malynowskyj e Renato Nóvoa pela constante colaboração.

Aos Professores e colegas do Curso pelo entusiasmo, incentivo e compreensão.

À Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA pela oportunidade de participar do Curso de Especialização em Siderurgia e pela autorização para publicar esta dissertação.

“Um homem precisa viajar para lugares que não conhece para quebrar essa arrogância que nos faz ver o mundo como o imaginamos, e não simplesmente como é, que nos faz professores e doutores do que não vimos, quando deveríamos ser alunos, e simplesmente ir ver”.

Amyr Klink

RESUMO

As siderúrgicas integradas geram diversos tipos de resíduos sólidos que podem ser classificados em: recicláveis contendo ferro; finos de coque e escórias. Entre os recicláveis contendo ferro estão as poeiras e lamas de alto forno e de aciaria, lama de tratamento de água de laminação, poeiras da sinterização e outros.

Os processos para reciclagem dos resíduos contendo ferro são limitados para uso em altos fornos pelo percentual de zinco e álcalis e consequente formação de carga inativa nesses reatores siderúrgicos.

Para desenvolver este trabalho foram elaboradas formulações para estudo de briquetes a serem usados nos conversores da aciaria, considerando as caracterizações dos resíduos sólidos usados.

A avaliação de potenciais utilizações envolve continuação do estudo de reciclagem das lamas de alto forno através do processo de briquetagem.

ABSTRACT

The integrated steel generate a great variety of solid waste that can be classified into: recyclable containing iron, coke's fine and slag. Among the recyclable containing iron, there are dust and sludge from blast furnace and steel works, mud water treatment lamination plants, sintering's dust and others.

The processes for recycling waste containing iron are limited for use in blast furnaces by the percentage of zinc and alkali and the consequent formation of inactive load on these reactors.

In order to develop this work, formulations were prepared for the study of briquettes to be used in converters of steelworks, considering the characterizations of solid wastes.

The evaluation of the potential uses involves continuation on the study of recycling the sludge blast furnace through the briquetting process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de funcionamento de um alto forno (American Iron And Steel)	6
Figura 2	Esquema e matérias primas para funcionamento de um alto forno (Infomet, 2007)	7
Figura 3	Vista de uma estrutura de limpeza dos gases (Infomet, 2007)	9
Figura 4	Outra vista de uma estrutura de limpeza de gases (Infomet, 2007) ...	10
Figura 5	Esquema do forno do Processo Tecnored ⁽⁷⁾	17
Figura 6	Esquema geral da planta de processamento ⁽⁸⁾	18
Figura 7	Esquema de espirais para concentração gravimétrica ⁽⁸⁾	19
Figura 8	Ciclone de separação ⁽⁸⁾	20
Figura 9	Fluxo de produção ⁽⁹⁾	20
Figura 10	Diagrama da planta piloto de pelotização de resíduos ⁽¹⁰⁾	23
Figura 11	Seqüência simplificada do processo de adição de pelotas auto-redutoras ⁽¹⁰⁾	24
Figura 12	Sistema de classificação da lama dos altos fornos na CSCo ⁽¹²⁾	27
Figura 13	Diagrama esquemático do hidrociclone ⁽¹⁴⁾	29
Figura 14	Conteúdo de zinco conforme tamanho das partículas da lama de alto forno ⁽¹⁴⁾	29
Figura 15:	Diagrama de reciclagem da lama de alto forno ⁽¹⁴⁾	30
Figura 16:	Fluxo de Gestão de resíduos e co-produtos na área de gusa da Arcelor/Mittal Tubarão ⁽¹⁷⁾	33
Figura 17:	Equilíbrio CO, CO ₂ , óxidos e silicatos de Zn – K - Na ⁽¹⁹⁾	36
Figura 18:	Equivalente térmico do briquete ⁽²⁶⁾	47
Figura 19:	Equivalente térmico do briquete "cosipa" ⁽²⁶⁾	48

LISTA DE TABELAS

Tabela I	Composições químicas dos materiais estudados (%) ⁽⁴⁾	12
Tabela II	Características físico-químicas da mistura de resíduos ⁽⁴⁾	12
Tabela III	Umidade (%) nas pilhas de resíduos sólidos ⁽⁴⁾	13
Tabela IV	Composição química dos concentrados produzidos ⁽⁸⁾	21
Tabela V	Características das matérias primas ⁽⁹⁾	21
Tabela VI	Proporção experimentada ⁽⁹⁾	22
Tabela VII	Características do aglomerado metálico ⁽⁹⁾	22
Tabela VIII	Composição das pelotas testadas ⁽¹⁰⁾	23
Tabela IX	Taxas de recuperação e remoção da lama de altos fornos ⁽¹²⁾	26
Tabela X	Geração e utilização de pós na usina de Mizushima, KWS ⁽¹³⁾	28
Tabela XI	Teores totais de Fe, Zn, Pb e Cd na lama de alto forno de usina Integrada ⁽¹⁵⁾	31
Tabela XII	Referências para a lama de alto forno da Arcelor/Mittal Tubarão (ES) ⁽¹⁷⁾	32
Tabela XIII	Composição química da lama de alto forno usada em cerâmica vermelha ⁽¹⁸⁾	34
Tabela XIV	Caracterização da lama de alto forno na COSIPA	39
Tabela XV	Destinação da lama de alto forno ⁽²²⁾	40
Tabela XVI	Caracterização química dos briquetes CST ⁽²⁵⁾	40
Tabela XVII	Condições de contorno e especificação do cenário de briquetagem ⁽⁴⁾	41
Tabela XVIII	Geração e análise química de resíduos usados na fabricação de briquetes “cosipa”	42

Tabela XIX	Análises químicas dos resíduos e do briquete "cosipa"	42
Tabela XX	Estimativa de Custo x Benefício para a alternativa proposta	43
Tabela XXI	Geração e consumo de resíduos sólidos para briquetagem	45
Tabela XXII	Análises químicas de resíduos e dos briquetes estudados	46
Tabela XXIII	Efeitos do briquete no rendimento de aço líquido e na composição química da escória ⁽²⁷⁾	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLCG	- Carepa de laminação de chapas grossas
COSIPA	- Companhia Siderúrgica Paulista
CSCo	- China Steel Co.
CSN	- Companhia Siderúrgica Nacional.
CST	- Companhia Siderúrgica de Tubarão.
DRI	- Direct Reduced Iron
EDS	- Espectrometria de dispersão de energia.
INFOMET	- www.infomet.com.br
KWS	- Kawasaki Steel.
LAFFF	- Lama de Alto Forno fração fina.
LAFFG	- Lama de Alto Forno fração grossa.
LD	- Linz Donawitz (Forno básico a oxigênio - BOF).
LOGFF	- Lama de Aciaria fração fina.
LOGFG	- Lama de Aciaria fração grossa.
PF	- Perda ao fogo.
pH	- Caracteriza a acidez de um líquido (potencial hidrogênio). O pH indica a quantidade de íons H ⁺ que se encontram livres num líquido.
POCOL	- Pó de coletor.
POPES3	- Pó de despoeiramento do precipitador eletrostático da sinterização
STE	- Equivalente térmico em sucata.

LISTA DE SIMBOLOS

ΔG^0 - Variação de energia livre.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE ABREVIATURAS e SIGLAS.....	iii
LISTA DE SIMBOLOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1 JUSTIFICATIVA	1
2 OBJETIVO.....	2
3 INTRODUÇÃO.....	3
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
4.1 Experiências com reciclagem de resíduos sólidos em sinterização	11
4.2 Reciclagem com pelotas auto-redutoras	13
4.3 Emprego de resíduos siderúrgicos e pellet feed.....	15
4.4 A lama do alto forno como matéria prima para o Processo Tecnored	16
4.5 A obtenção de concentrado de carbono e ferro a partir da lama de alto forno	17
4.6 Produção de pelotas auto-redutoras numa sinterização piloto	21
4.7 Processamento de pelota auto-redutoras	23
4.8 Tendências tecnológicas em usinas siderúrgicas do exterior.....	24
4.8.1 Recuperação da lama de alto forno na China Steel Co. (CSCo).....	25
4.8.2 Projeto “Resíduo Zero” na Usina de Mizushima da Kawasaki Steel	27
4.8.3 Realizações da Posco para reciclagem de lama	28
4.9 Outras alternativas de uso e aplicações para a lama de altos fornos	30
4.9.1 Na agricultura	30
4.9.2 No setor cerâmico	31
4.9.3 Adsorção de metais pesados	34
4.10 A influência do zinco e de ácalis contidos nos resíduos siderúrgicos	35
4.10.1 Compostos de zinco	36
4.10.2 Compostos de potássio	37
4.10.3 Compostos de sódio	38

5	DISCUSSÃO.....	38
5.1	Características da lama de alto forno da Cosipa.....	38
5.2	A reciclagem da lama de alto forno	40
6	CONCLUSÃO	51
7	BIBLIOGRAFIA	53

Anexo A: Estimativa de Custo x Benefício.



1 JUSTIFICATIVA

Nos processos industriais o conceito de desenvolvimento sustentável vem sendo observado na busca da qualidade ambiental integrada com a produção para agregar vantagem econômica e melhoria de capacidade competitiva.

Isso significa que os recursos devem ser usados de forma mais inteligente, com visão do futuro: “desenvolvimento sustentável é definido como o desenvolvimento que satisfaz as necessidades e aspirações da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem suas próprias necessidades”. Para tanto, as ações devem se apoiar no conceito de atender às dimensões social, econômica e ambiental, que devem ser integradas e guiar esse desenvolvimento.

A Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA – se enquadra nessa situação. Sendo uma usina siderúrgica integrada, tem grande impacto sobre o meio ambiente, pois, além de consumir recursos não renováveis (por exemplo, minério de ferro), utiliza grandes quantidades de água, gases industriais e energia elétrica, gerando resíduos variados, constituídos de efluentes sólidos, líquidos, gasosos e energia, principalmente, térmica.

Considerando-se a etapa de redução dos minérios de ferro nos altos fornos, são gerados como resíduos sólidos:

- Escória.
- Pó de coletor.
- Lamas de alto forno.

A escória, principal resíduo em quantidade gerada, uma vez granulada (formação da fase vítreia e facilidade de manuseio), tem aplicação como matéria prima para a produção de cimento, lã de vidro, vidraria; asfalto, aterros, lastro de ferrovias, bases de rodovias.

O pó de coletor é reciclado na sinterização.

As lamas dos altos fornos para serem descartada apresentam vários inconvenientes, tais como:

- Necessidade de grandes áreas para o descarte.
- Elevado custo de transporte e preparação da área de descarte.
- Perda de materiais.
- Agressão ao meio ambiente.

Atualmente, esses resíduos são estocados em local controlado, uma prática que busca atender à crescente severidade da legislação ambiental, porém, não soluciona os problemas, seja porque pode tornar mais onerosa a remediação dos passivos ambientais, seja porque pode ser considerado desperdício, uso inefficiente de matérias primas.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão das principais alternativas de usos e aplicações de resíduos siderúrgicos contendo óxido de ferro, principalmente as lamas dos altos fornos, e estudar a possibilidade de sua reciclagem na forma de briquetes, nos conversores da aciaria.

3 INTRODUÇÃO

Uma usina siderúrgica integrada produz aços a partir de matérias primas ferrosas aglomeradas (sinter e pelotas) ou não (minério de ferro granulado), combustível (coque metalúrgico), fundentes e injeções auxiliares (por exemplo, finos de carvão), gerando grande quantidade de resíduos industriais diversificados, constituídos de efluentes sólidos, líquidos, gasosos e energia, principalmente térmica. Observa-se que a reutilização desses materiais tem motivado diversos estudos e cada usina siderúrgica tem buscado e encontrado a solução mais adequada à sua situação e a de seus equipamentos.

Segundo Oliveira ⁽¹⁾, o processo siderúrgico em usinas integradas gera para cada 1 t de aço fabricada cerca de 615 kg de resíduos sólidos, a saber:

- escória de alto forno = 270 kg
- escória de aciaria = 120 kg
- pós e lamas = 60 kg
- carepas = 10 kg
- finos de coque = 15 kg
- outros = 140 kg

Do ponto de vista ambiental, qualquer resíduo é um agressor do meio ambiente.

Quatro alternativas são, normalmente, empregadas para a solução do problema:

- Redução da geração na fonte – diminuição de volume, peso, periculosidade do resíduo, o que demanda troca de processo ou de matérias primas.
- Reutilização - segregação na fonte geradora; reuso sem alterações físicas ou químicas.
- Reciclagem – reaproveitamento, com ou sem beneficiamento, como matéria prima no mesmo processo gerador; eliminação da destinação do resíduo para aterros licenciados, incineradores (queima em fornos especiais para destruição de compostos perigosos) ou co-processamento (queima em fornos como fonte térmica), que demande custo para seu tratamento.
- Recuperação – reaproveitamento, após beneficiamento, como matéria-prima em outros processos, diferentes do processo gerador.

A procura de processos que diminuam a geração de resíduos sólidos, assim como o seu reaproveitamento, tornou-se uma prioridade. Por maior que seja a eficiência do

processo, resíduos são inevitáveis. A isso, pode-se acrescentar a multiplicação acelerada e as condições que limitam cada vez mais o descarte final desses resíduos.

A preocupação das indústrias está em utilizar “tecnologia limpa”, ou seja, encontrar uma solução econômica, ambiental e tecnologicamente integrada a seus processos e produtos.

3.1 Processo do Alto Forno

Conforme Quites⁽²⁾, pode-se considerar o alto forno como um equipamento destinado a produzir gusa líquido, a uma temperatura de 1500 °C, com qualidade e quantidade necessárias ao bom funcionamento dos processos produtivos subsequentes.

Além disso, o alto forno é considerado o reator mais complexo da Metalurgia porque:

- Ocorrem em seu interior inúmeras reações, estando presentes os três estados da matéria: sólido, líquido e gasoso.
- O gradiente de temperatura varia desde 2000 °C (na zona de combustão do coque) até 150 °C (no topo do forno, saída dos gases).

As Figuras 1 e 2 dão uma idéia geral dos equipamentos e do processo.

Partindo dos pátios de estocagem de minérios e dos processos anteriores (Sinterização e Coqueria), as matérias primas são transferidas para a casa de silos, através de correias transportadoras. Cada material é estocado num silo separado, equipado com balança. Uma vez pesados, segundo quantidades predeterminadas de maneira a se obter um gusa de composição química desejada, as matérias primas são carregados pelo topo do alto forno.

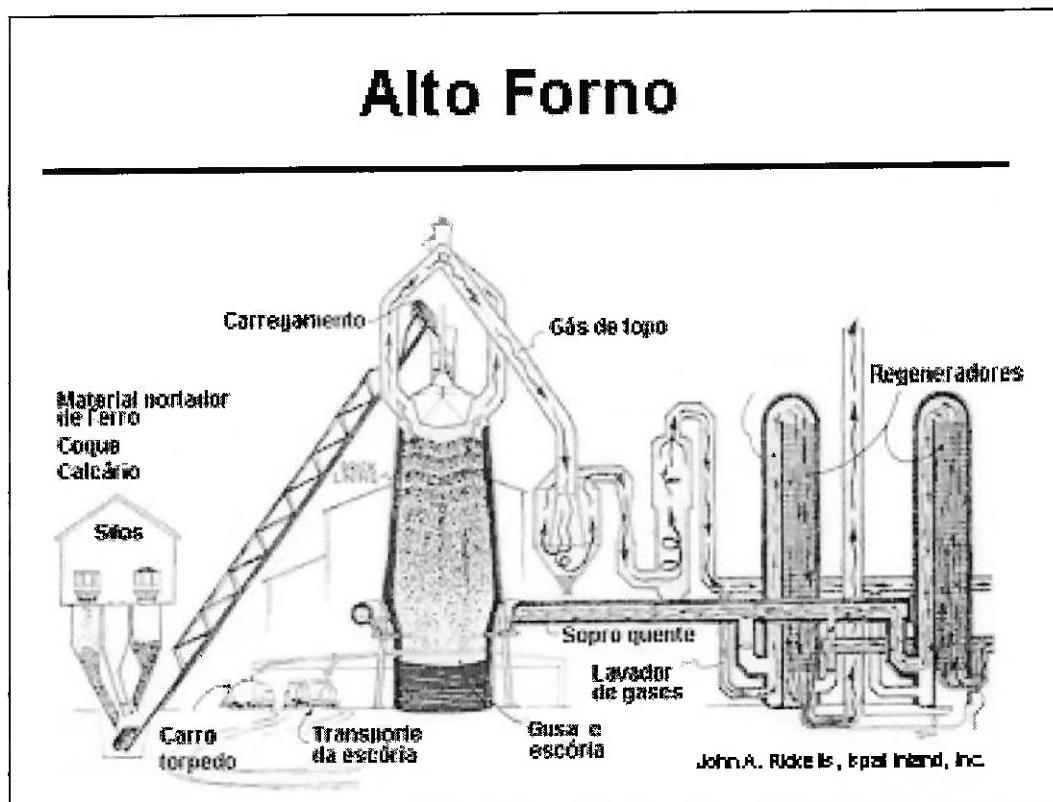


Figura 1 – Esquema de funcionamento de um alto forno (American Iron and Steel, 2006)

Para tanto, podem ser encontrados dois sistemas de carregamento: através de carro skip tracionado por cabos de aço e através de correias transportadoras até o topo do forno, onde existem equipamentos que visam selagem de gases, recebimento e distribuição uniforme da carga, de importância fundamental para a operação do forno, pois, é um dos fatores determinantes da eficiência de trocas térmicas e das reações de redução.

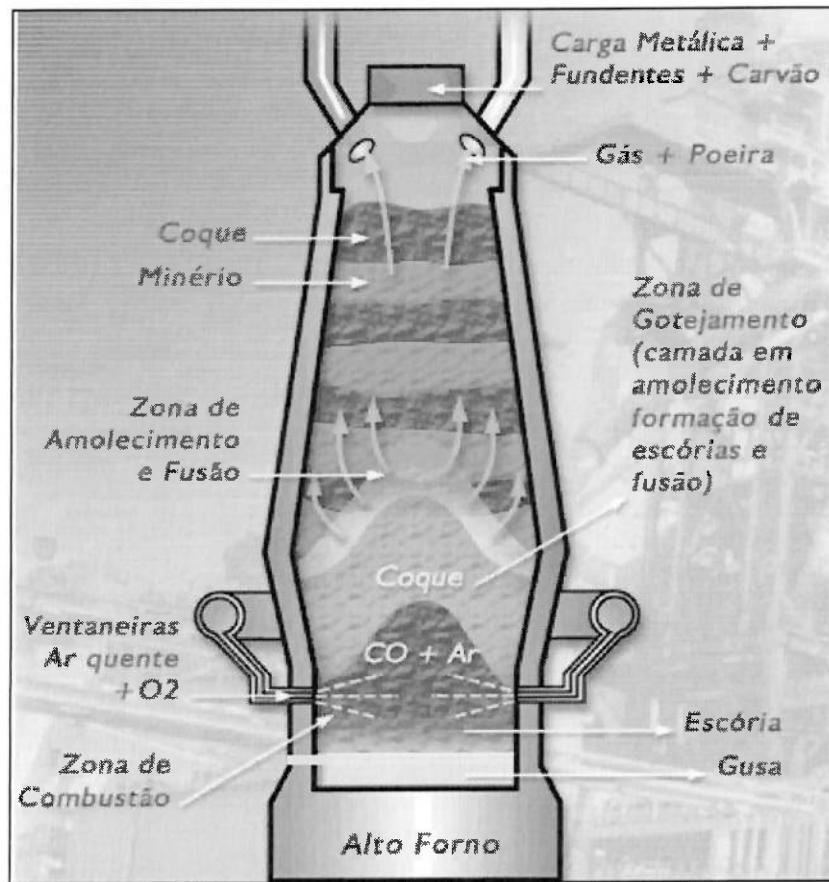


Figura 2 – Esquema e matérias primas para funcionamento de um alto forno (InfoMet, 2007).

Uma breve descrição desse processo mostra que o coque é o combustível básico, que contém cerca de 86 %C e que reage com o ar quente injetado pelas ventaneiras, gerando o calor necessário para o processo, além de produzir um gás composto principalmente de nitrogênio e monóxido de carbono (CO) a altas temperaturas, que funciona como principal redutor dos óxidos de ferro. Portanto, o ar quente promove a combustão do coque, gerando grande quantidade de calor e volume de gases.

Estes produtos da combustão fluem para o topo do reator através dos vazios existentes entre as partículas da carga, ao mesmo tempo em que transferem o calor para a carga que se movimenta em sentido contrário (descida).

Portanto, a carga fria, carregada pelo topo, descendo para as regiões inferiores, vai sendo aquecida pela corrente de gases que, saindo da região das ventaneiras a cerca de 2000 °C, transfere calor à medida que sobe, de modo que chega ao topo do forno com temperatura média entre 100 e 250 °C. Consequentemente, do topo até o cadinho, as temperaturas das regiões do forno vão aumentando, até passar por um máximo em frente das ventaneiras, onde ocorre a combustão do coque.

Na região inferior do alto forno, gusa e escória produzidos são separados por diferença de densidade no canal principal, sendo o gusa vazado em carros torpedo (para transporte até a aciaria) e a escória é granulada por meio de jato de água de alta pressão, para posterior aproveitamento, como já mencionado, na fabricação de cimento.

Pode-se dizer que os altos fornos têm recebido significativos avanços ao longo das últimas décadas com o desenvolvimento de técnicas para aumento de produtividade, aumento na disponibilidade do reator, flexibilidade de matéria-prima e redução no consumo de combustíveis, sempre com a busca paralela de maior adequação ambiental. Portanto, o processo do Alto Forno entra nesse Século XXI ainda mais competitivo e novas unidades estão sendo instaladas no Brasil e o mundo.

Sob o aspecto de controle do meio ambiente, a melhor técnica de operação disponível tem que abranger aspectos relacionados com:

- a redução das poeiras provenientes das casas de corrida.
- o tratamento da água proveniente do sistema de lavagem dos gases.
- a reutilização da escória e das poeiras/lamas geradas.
- a minimização da quantidade de energia necessária.
- a reutilização do gás gerado.

Especificamente, quando se trata de resíduos sólidos, considera-se que a seguinte seqüência corresponda à melhor técnica disponível por ordem decrescente de prioridade:

- minimização da produção de resíduos sólidos.
- aproveitamento eficaz (reciclagem ou reutilização de resíduos sólidos/subprodutos, em especial a reciclagem das poeiras de partículas de grande dimensão, resultantes do tratamento dos gases e das poeiras provenientes do despoieiramento das casas de corrida; reutilização total da escória).
- enobrecimento para comercialização.
- eliminação controlada de resíduos/subprodutos inevitáveis (fração de finos das lamas resultantes do tratamento dos gases).

3.2 A geração de lama no alto forno

No topo do forno, existem uptakes pelos quais o gás quente que sai do alto-forno arrasta partículas sólidas, sendo direcionado para baixo por meio de um downcommer.

O gás desce pelo downcommer até um coletor de pó, onde as partículas mais grosseiras se depositam, acumulam ou são descarregadas sobre um vagão ferroviário (Alto Forno 2) ou em caminhões (Alto Forno 1). Na seqüência, o gás passa por uma lavagem num equipamento tipo venturi, onde são removidas as partículas mais finas na forma de lama, em duas frações: uma grossa (LAFFG) e outra fina (LAFFF). Após limpo, o gás é um combustível que pode ser reaproveitado no restante da usina, para aquecimento de fornos, panelas, regeneradores, além de outros equipamentos. As Figuras 3 e 4 indicam vistas gerais de sistema de limpeza de gases.



Figura 3 – Vista de uma estrutura de limpeza dos gases (InfoMet, 2007)

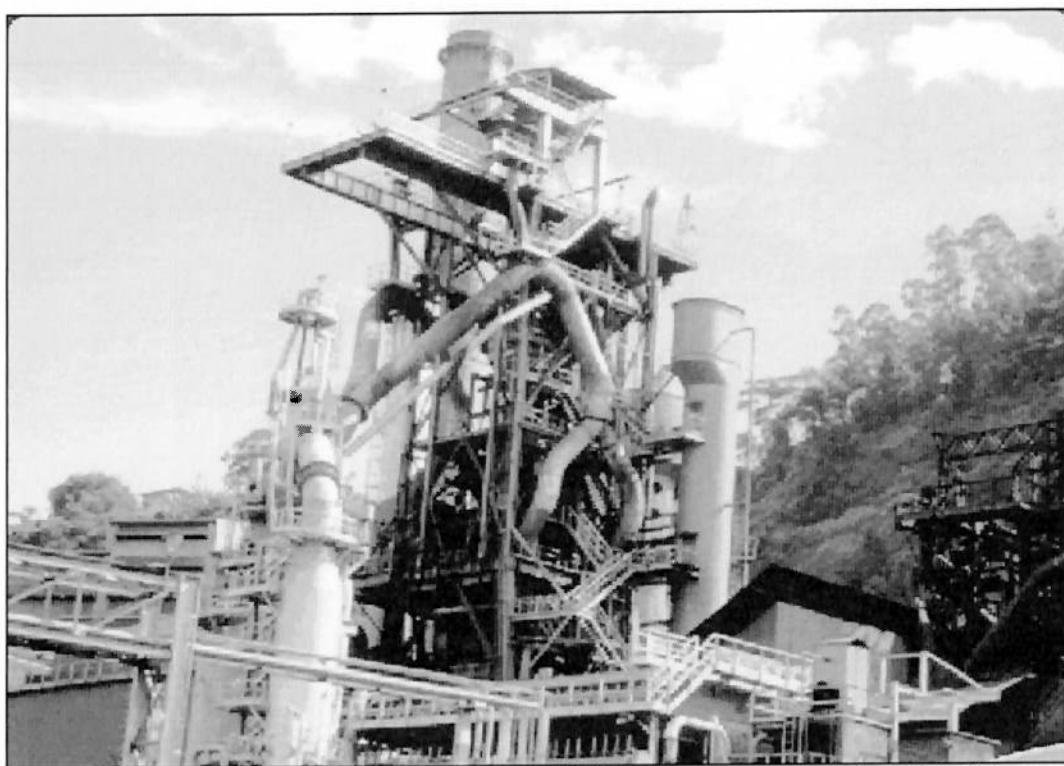


Figura 4 – Outra vista de uma estrutura de limpeza dos gases (InfoMet, 2007)

O pó do coletor é, em grande parte, produto do arraste mecânico de finos da carga do forno. É constituído, principalmente, por partículas de minério, fundentes e coque, removidas antes de qualquer reação química.

As lamas dos altos fornos, produzidas pelo emprego de venturis na lavagem dos gases, constituem-se de partículas em geral provenientes de regiões inferiores da cuba. Nelas os teores de ferro total são mais elevados, assim como os de zinco e chumbo volatilizados na cuba e recristalizados no venturi; já os teores de cálcio, magnésio e silício tendem a ser menores, segundo Pereira e Almeida⁽³⁾.

Conforme N. G. West apud Pereira e Almeida⁽³⁾, a geração desses resíduos sólidos costuma variar entre 10 e 20 kg/t de gusa.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Cada usina tem buscado e encontrado a solução mais adequada à sua situação e a seus equipamentos, no que diz respeito às possíveis rotas de destinação dos resíduos sólidos.

Em 1972, Coelho e colaboradores apud Pereira e Almeida⁽³⁾ concluíram que, dada a quantidade de pós gerados na Usiminas, seu consumo direto, sem minipelotização, na produção de sínter não seria prejudicial à produtividade da usina ou à qualidade do produto.

Em 1981, Pereira e colaboradores apud Pereira e Almeida⁽³⁾ estabeleceram alguns critérios para a viabilização econômica de um processo de aproveitamento:

- Conjuntura econômica do País e política de controle ambiental adotada.
- Níveis de produção na usina.
- Características dos resíduos gerados.
- Projeto da usina e características dos equipamentos existentes.
- Níveis de elementos indesejáveis nos resíduos e tolerância máxima.
- Custo dos insumos envolvidos.

As grandes siderúrgicas integradas se enquadram nesta situação. O grande aporte de insumos, o elevado consumo de energia e geração de uma variedade de rejeitos levaram tais indústrias à procura de meios de recuperação desses rejeitos que significassem economia de consumo de matérias- primas e energia.

Ao tratarem da situação brasileira com relação ao aproveitamento de resíduos siderúrgicos, aqueles autores chamavam a atenção para o progressivo agravamento do problema com a expansão das instalações existentes, afetando as condições ambientais; recomendavam o estudo de soluções simples, de baixo custo e que incorporassem as unidades existentes.

4.1 Experiências com reciclagem de resíduos sólidos em sinterizações

A reciclagem foi tentada em duas etapas, conforme comenta Galdeano et al.⁽⁴⁾. Na primeira etapa, foram utilizados cal fina, carepa de laminação, pó de apagamento de coque, sucata C (proveniente da escória de Aciaria beneficiada para recuperação de metálicos), rejeito industrial fino (proveniente de limpeza das áreas), calcário e dolomita da calcinação.

Na segunda etapa, era objetivado reciclar pós e lamas que eram depositados em aterros fora da usina: moínha, rejeitos industriais finos, escória de alto forno, pó de coletor, lamas de altos fornos, pós das casas de corridas, lama de LTQ, lama de cal, finos de cal, sucata C de aciaria, pó de fundição, pó de dessulfuração do gusa, carepas finas, etc.

A Tabela I mostra as composições químicas dos materiais estudados e a Tabela II, as características físico-químicas da mistura de resíduos:

Além das dificuldades de manuseio das lamas devido à alta umidade, outros inconvenientes foram observados em três principais alternativas adotadas:

- secagem das lamas ao tempo, retomando-as com trator de esteira e peneiramento.

Inconveniente observado: falta de espaço e instalações nas usinas.

- fazer pelotas com as lamas e consumi-las nos altos fornos.

Inconveniente: alto investimento.

- utilizar processo de mistura e pelotização de lamas, pós e finos de sinter degradado num misturador intensivo e usar na Sinterização.

Inconveniente: solução que exigia instalação de muitos equipamentos (silos, dosadores, misturadores, etc).

Tabela I – Composições químicas dos materiais estudados (%)⁽⁴⁾

RESÍDUOS	Fe t (%)	FeO (%)	Fe ^a (%)	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	Mn (%)	S (%)	C (%)
Pós das sinterizações	50~54	2~4	0,15	7~8,5	2	5~7	1~2	0,4~0,6	0,2	4~5
Pó de alto forno	24~27	3~5	0,25	6~7	2,5	2~3,5	0,1~0,7	0,2~0,4	0,3~0,5	40~45
Lama de alto forno	25~28	4~9	0,45	6	2,5	1,5~2,5	0,4~0,6	0,2~0,4	0,6	40~45
Lama grossa do sist. OG	70~85	-	45~65	1~3	0,05~0,25	6~9,5	0,8~1,6	0,5~1,5	0,04~0,06	0,8~1,3
Lama fina do sist. OG	62~66	35~65	12~20	1,3~1,4	0,1~0,2	6~8	1~2	1,2~1,4	0,15~0,20	1~2
Pó do sist. sec. LD	60	9	1,5	1,5	0,5	3	2	1	0,2	2
Pó do forno elétrico	35~40	0~5	2,5~5,5	0,4~0,9	1,4~1,9	4~6	10~14	04/jun	0,15~0,30	1,5~2,5

ANÁLISE QUÍMICA (%)

SiO2 (%)	Al2O3 (%)	MgO (%)	CaO (%)	Fe (t) (%)	Fe (met) (%)	Fe2O3 (%)	S (%)	P (%)	C livre (%)	FeO (%)	K2O (%)	Na2O (%)	Pb (%)	Zn (%)	Cr (%)	Mn (%)
4,62	0,92	2,7	8,75	49,9	2,15	42,3	0,16	0,07	8,11	23,5	0,06	0,04	0,01	0,56	0,01	0,6

Tabela II – Características físico-químicas da mistura de resíduos⁽⁴⁾

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (mm)									
9,52	6,35	3,17	2	1	0,5	0,106	0,106	Umidade (%)	
2,66%	4,86%	18,58%	10,18%	11,80%	12,33%	22,09%	17,15%		10,05%

Uma outra alternativa mencionada foi a mistura de materiais secos com úmidos na proporção em que eram gerados, de modo que depois de certo tempo se obtivesse uma mistura com teor de umidade que permitisse o seu manuseio.

Ainda segundo Galdeano et al. ⁽⁴⁾, o comportamento de pilhas sem uso de agente externo pode ser resumido conforme Tabela III.

Tabela III - Umidade (%) nas pilhas de resíduos sólidos ⁽⁴⁾.

INSTANTE	Inicial	1 dia	1 semana	1 mês
% umidade	12,00	9,32	6,39	2,60
% perda	-	22	47	78

Em escala industrial, lamas e material seco foram misturados com pá carregadeira, além de se empregar finos de sinter descartados como agente acelerador de secagem. A mistura assim formada era revolvida de maneira a obter uniformização e secagem mais rápida.

A reciclagem dos resíduos sólidos, assim misturados, recebeu o nome de Método de Secagem por Mistura e Evaporação. Testes na sinterização, usando uma proporção de 3 e 5% da mistura total foram considerados viáveis, não acarretando problemas de qualidade, produção e meio ambiente.

A reciclagem de resíduos sólidos ricos em ferro na sinterização tornou-se uma prática comum nas usinas, principalmente por suas características de granulometria. Entretanto, como pode ocorrer alta porcentagem de material particulado inferior a 0,105 mm, essa prática não é a mais recomendada porque diminui a permeabilidade do leito da carga e causa perda de produtividade.

Ainda mais, a caracterização das lamas do alto forno indica a presença de álcalis que são compostos indesejáveis no processo de redução do minério de ferro, uma vez que podem ser responsáveis pela formação de cascões. Uma vez carregados no alto forno, parte dos mesmos recircula no seu interior, em ciclos de evaporação / condensação.

4.2 Reciclagem com pelotas auto-redutoras

Nascimento et al. ⁽⁵⁾ estudaram a possibilidade de reciclar resíduos sólidos ricos em ferro, usando material produzido na COSIPA e a tecnologia de auto-redução. Por exemplo, foram experimentados, em escala de laboratório, lamas de Alto Forno,

moínha de coque, frações grossa e fina da coleta de gases da Aciaria LD, lamas do sistema de tratamento de águas de Laminção.

A auto-redução é uma possível alternativa para reciclagem desses resíduos, obtendo-se ferro esponja, DRI (processos Fastmelt – Inmetco) ou gusa líquido (processo Tecnored). O processo de pelotização foi devido à obtenção das matérias primas por simples desintegração ou eventual moagem / classificação e o uso de finos de coque como redutor.

Quanto às lamas de Alto Forno, LAFFF e LAFFG, altos teores de carbono e hematita comprovaram a geração dos finos pelo carreamento de partículas originadas na redução decorrente do fluxo ascendente dos gases em contra corrente no interior do reator.

As experiências provaram a potencialidade da reciclagem desses resíduos sólidos ricos em ferro, pois, foi obtido produto utilizável numa etapa de fusão posterior.

Observe-se também que microanálises, via EDS, de finos de LAFFF mostraram hematita e finos de coque como constituintes, mas microrregiões contendo ferro, carbono (ou oxigênio) e sódio, alumínio, silício, enxofre, cálcio e manganês. No caso da LAFFG, a microanálise, via EDS, indicou finos de hematita e de coque, mais microrregiões com ferro, oxigênio (e/ou carbono) mais alumínio, silício, enxofre, sódio (ou cálcio) e fósforo.

Como resultado técnico, Nascimento et al.⁽⁵⁾ concluíram que essas pelotas auto-redutoras poderiam ser reaproveitadas com vantagens na Aciaria. Após a cura, fariam parte da carga sólida do conversor LD, junto com a sucata. Uma vez carregado o gusa líquido, as pelotas seriam reduzidas e o ferro obtido seria incorporado ao banho. Outras vantagens foram destacadas:

- processo simples e versátil.
- valorização de matéria prima de custo negativo para o aço líquido.
- menor custo do processo de pelotização de cura a frio para aglomeração de finos.
- não haveria necessidade de usar finos indesejáveis na sinterização.
- resíduos contendo zinco também poderiam ser utilizados.

4.3 Emprego de resíduos siderúrgicos e pellet feed

Oliveira e Martins ⁽⁶⁾ pesquisaram a alternativa de fabricação de mini-pelotas, utilizando em sua composição resíduos sólidos siderúrgicos e de pellet feed, alimentados numa unidade de sinterização. A hipótese assumida foi que a carga constituída de resíduos sólidos finos, alimentada na sinterização em forma de mini-pelotas, não alteraria as especificações dos respectivos produtos e também não implicaria nas características dos tipos de emissões (atmosférica, líquida e sólida) geradas.

O melhor ensaio em termos de resistência mecânica, para pelotas de 6,0 e 10,5 mm, foi obtido para uma mistura com:

Pellet feed	35,39 %	aglomerado
Lama de Aciaria	13,72 %	aglomerado
Lixo industrial	16,75 %	aglomerado
Calcário calcítico, fino reciclado da Calcinação	6,00 %	aglomerante
Dolomita fina, reciclada da Calcinação	2,36 %	aglomerado
Escória de LD	6,86 %	aglomerado
Cal recuperada de despoieiramento	6,00 %	aglomerante
Pó de despoieiramento da Coqueria	5,44 %	aglomerado
Pó de balão de Alto Forno	4,34 %	aglomerado
Pó de balão de Alto Forno a carvão vegetal	3,14 %	aglomerado

Concluíram que os resíduos indicados a princípio como aglomerantes apresentavam tal característica, que o grau aglomerativo dependia da proporção com que se apresentavam na mistura a ser pelotizada, bem como do tipo de cura adotado.

Assim as variáveis existentes na qualidade e na quantidade de tais materiais, não somente entre as diversas usinas, mas também numa mesma usina, ao longo do tempo, devem ser consideradas nos estudos de recuperação de pós e lamas em siderurgia. Os resultados indicaram valores satisfatórios para o emprego das mini-pelotas na unidade de sinterização, ressaltando-se que as misturas somente puderam ser pelotizadas com teores de umidade na faixa de 10 a 14%; as misturas possuíam outros constituintes com características aglomerativas; a cura seca foi ao mesmo tempo a melhor e mais econômica maneira de se curar as pelotas produzidas.

4.4 A lama de alto forno como matéria prima para o Processo Tecnored

Os altos fornos sofreram ao longo dos anos significativos avanços, com o desenvolvimento de técnicas de produtividade, aumento de disponibilidade, flexibilidade de matérias primas e redução no consumo de combustíveis, sempre observando os cuidados com o meio ambiente. Apesar disso, estão continuamente ameaçados por tecnologias emergentes, com a promessa de serem mais baratas, eficientes, limpas e flexíveis.

Entre estas tecnologias emergentes, destacam-se os processos que se baseiam na utilização de aglomerados auto-redutores, onde o agente redutor (carbono) é adicionado diretamente à mistura a ser pelotizada ou briquetada.

O processo Tecnored tem como característica a flexibilidade no uso de matérias primas não convencionais como fonte de ferro e carbono combustível / redutor. Para a produção do ferro primário, incluindo a utilização de resíduos sólidos gerados e / ou de terceiros.

Noldin Jr. et al.⁽⁷⁾ discutiram os principais aspectos relacionados à utilização de matérias primas alternativas na fabricação do ferro primário empregando o processo Tecnored. Nesse processo os aglomerados auto-redutores, curados a frio, são produzidos a partir de uma mistura de finos de minério de ferro ou resíduos ferrosos e um agente carbonoso (redutor), como finos de carvão mineral, vegetal, coque de petróleo ou ainda resíduos siderúrgicos ricos em carbono. Estes materiais são misturados com agentes fluxantes e ligantes e então aglomerados em discos de pelotização ou briquetadoras.

Os aglomerados na forma de pelotas ou briquetes são curados em secadoras/curadores especiais, conferindo-lhes as propriedades mecânicas necessárias para as solicitações de manuseio externo ou de processo.

Os aglomerados são carregados num reator de geometria especial, o forno Tecnored, conforme mostrado na Figura 5, caracterizado por duas inovações: a alimentação lateral de combustível e a queima secundária.

A alimentação lateral dos combustíveis previne a ocorrência da reação de gaseificação do carbono (reação de Boudouard) na cuba superior do forno, resultando em economia da combustível.

A queima secundária, através da energia gerada pela combustão do monóxido de carbono vindo das regiões inferiores do forno, é responsável pela redução das pelotas. Após reduzidos, os aglomerados são fundidos na “zona de fusão”, sob atmosfera redutora, onde ocorre a escorificação da ganga e das cinzas no estado líquido.

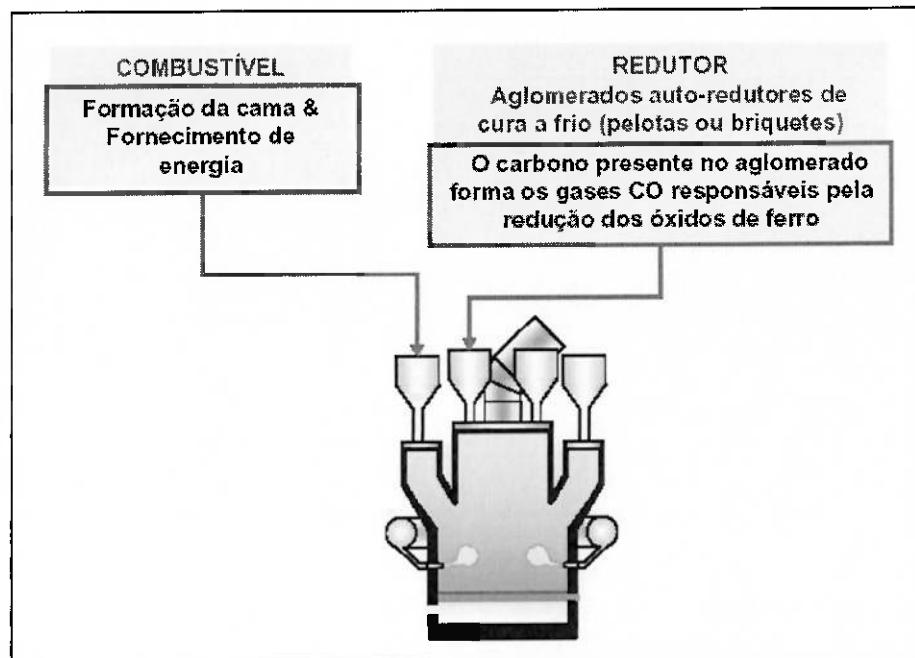


Figura 5 – Esquema do forno do Processo Tecnored

As gotas de metal e escória acumulam-se na “cuba inferior” do forno (cadinho), onde ocorre o superaquecimento do metal e da escória.

Em todas as suas versões, o Processo Tecnored, devido a sua alta eficiência energética, simplicidade de operação e de equipamentos, flexibilidade no uso de matérias primas e alta compatibilidade ambiental, vêm sendo apontados por diversos estudos, como a melhor via de produção do metal líquido.

A flexibilidade no uso de diferentes matérias primas permite o uso de diferentes fontes de ferro como carga, pois, minérios ultrafinos, rejeitos de lavra e de barragens, minérios de baixo teor em ferro e alta ganga, carepas, pós e lamas siderúrgicas.

4.5 Obtenção de concentrado de carbono e ferro a partir da lama de alto forno

É uma matéria prima potencial para reciclagem nos processos de redução. No entanto, sua incorporação “in natura” não é viável em função dos teores de zinco e a consequente possibilidade de formação de carga inativa. Assim, Vieira et al. ⁽⁸⁾

descreveram um processo de reciclagem das lamas de alto forno, também aplicável ao pó de balão (pó de coletor), considerando a combinação de vários métodos: formação de polpa, bombardeamento com ultrasom, condicionamento, concentração gravimétrica, ciclonagem, separação magnética, flotagem e secagem, com o objetivo de recuperar carbono, óxidos de ferro, sílica, óxido de cálcio e óxido de zinco.

A lama é coletada nas saídas dos filtros a vácuo, podendo ser coletada nas saídas dos espessadores ou através de dragagem nos fundos das piscinas de decantação ou de aterros industriais e, daí, alimentada na planta de processamento por transporte terrestre ou por bombeamento.

Na alimentação por transporte terrestre, a lama é transferida sobre uma plataforma contendo um silo com alimentador de rosca ou alimentador vibratório ou correia transportadora. Este equipamento se situa abaixo do nível do piso para facilitar a extração do material que alimenta um tanque de agitação mecânica contendo um sistema de geradores de ultrasom de alta potência.

A Figura 6⁽⁸⁾ apresenta uma vista geral da instalação da planta de processamento.

Os geradores de ultrasom geram ondas que provocam efeitos de cavitação e mecânico-vibratório que atuam diferentemente em cada substância, devido às propriedades físico-químicas de cada componente. Isto provoca a dissociação e a limpeza das partículas.

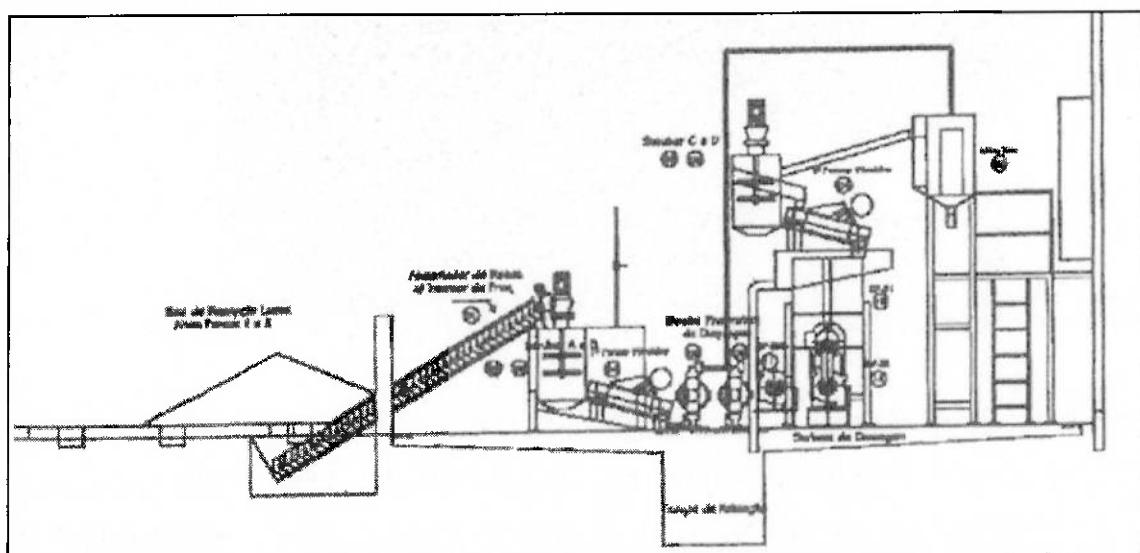


Figura 6 – Esquema geral da planta de processamento⁽⁸⁾.

Observe-se que cavitação é um fenômeno basicamente entendido como a seqüência dos eventos de formação de bolhas de vapor, com o seu posterior

desenvolvimento, implosão ou explosão, tendo como origem a queda de pressão associada a pequenos núcleos existentes nos líquidos.

A adição de água forma uma polpa homogênea, com 15 a 35% de sólidos, disposta numa peneira vibratória para a retirada de corpos estranhos, maiores que 2 mm, que recebe nova adição de água e é bombeada para um condicionador com agitação mecânica. Este condicionador pode conter aditivos para neutralizar o pH e outras propriedades, de maneira a facilitar o melhor condicionamento de aditivos e componentes a serem separados, compondo uma polpa livre de fragmentos.

Uma vez condicionada, a polpa é bombeada para um conjunto de três níveis de espirais concentradoras gravimétricas. A Figura 7⁽⁸⁾ indica o esquema dessas espirais de concentração gravimétricas.

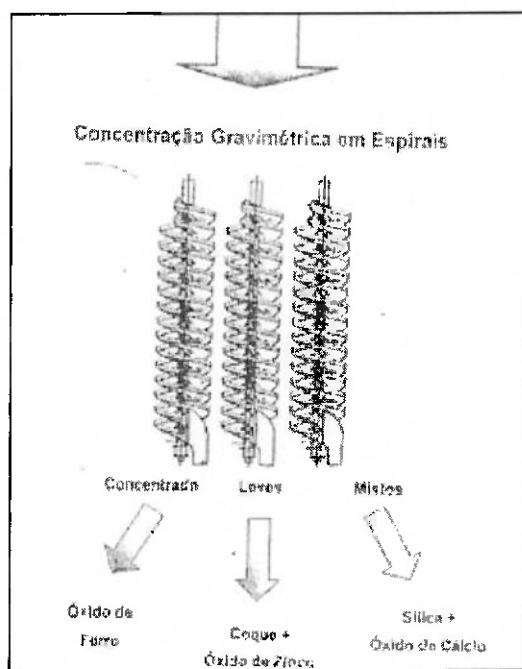


Figura 7 - Esquema de espirais para concentração gravimétrica⁽⁸⁾.

Nessas espirais promove-se a concentração de minerais mais pesados, leves e mistos. Os primeiros são compostos de óxido de ferro e outros componentes com ferro; os segundos são sílica, calcário, carbono e óxido de zinco, gradativamente, em cada um destes níveis; finalmente, a fração menos densa, antes de passar em cada nível de espiral é recondicionada com novos aditivos e agitação mecânica.

A fração mais pesada (óxido de ferro e outros componentes com ferro) forma um concentrado bombeado para dois conjuntos de ciclones, visando aumentar sua porcentagem de sólidos.

Os mistos são bombeados para um segundo conjunto de dois níveis de espirais secundárias, uma sobreposta à outra, onde é promovida a concentração de minerais

mais pesados (óxido de ferro e outros componentes com ferro) dos componentes sílica, calcário, carbono e óxido de zinco, gradativamente, em cada um desses níveis. Há, também, uma reciclagem dos mistos nesse mesmo conjunto de espirais. Os mistos e leves resultantes das espirais primárias e secundárias, com sílica, óxido de cálcio e coque são levados para um terceiro conjunto com dois níveis de espirais terciários, uma sobreposta à outra, projetados exclusivamente para a separação de minerais de menor densidade e granulometria fina, promovendo-se a separação dos minerais de sílica mais óxido de cálcio dos minerais de carbono.

A polpa contendo sílica e óxido de cálcio é bombeada para conjuntos de hidrociclones, que geram um *underflow* coletado em silo ou caçamba e um *overflow* bombeado para um espessador.

A fração contendo, basicamente, coque é também bombeada para um conjunto de hidrociclones, onde o *overflow* contendo maior teor de zinco é bombeado para outro conjunto de ciclones, do qual o *overflow* contendo coque com alto teor de zinco é prensado em filtro prensa, gerando uma torta de coque com alto teor de zinco.

Os *underflow* dos conjuntos de ciclones são bombeados para um separador eletromagnético que separa minerais magnéticos (óxido de ferro) dos minerais não magnéticos (coque). Esta fração não magnética, rica em coque e isenta de óxido de ferro, é destinada para uma célula de flotação, onde são flotados os minerais de coque e deprimidos os de sílica, óxidos de cálcio e de zinco. Finalmente, o material flotado, concentrado final de coque é destinado a filtro prensa, gerando uma torta prensada de coque com baixo teor em zinco.

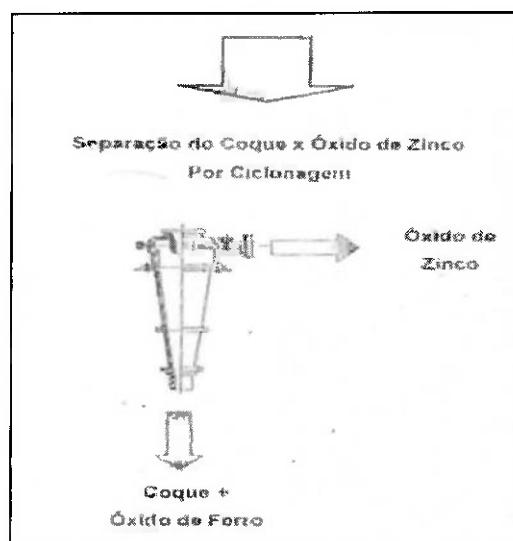


Figura 8 – Ciclone de separação⁽⁸⁾.

A Tabela IV mostra as características dos concentrados produzidos.

Tabela IV - Composição química dos concentrados produzidos⁽⁸⁾.

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	ZnO	Fe (total)	C (T)
Conc. de Carbono	3,39	2,65	0,09	1,02	0,15	2,30	65,25
Conc. Misto	13,50	2,01	0,32	6,89	3,25	34,25	22,40
Conc. de Ferro	7,89	1,80	0,26	3,05	0,14	65,20	5,10

Estes concentrados estão sendo empregados em:

- Concentrado de Carbono: sinterização, substituindo antracito.
- Concentrado de Ferro: sinterização, substituindo o sinter feed.
- Concentrado Misto: em estudos.

4.6 Produção de pelotas auto-redutoras numa sinterização piloto:

Um outro aproveitamento da lama de altos fornos registra a produção de carga metálica com concentrados provenientes dessa lama e, como já observado, ricos em ferro e carbono.

Vieira et al.⁽⁹⁾ desenvolveram estudo de alternativa, em escala laboratorial, para utilização dos pós e lamas que são disponibilizados em aterros.

Pela alternativa estudada, obtiveram-se pelotas auto-redutoras, queimadas num forno de sinterização em escala laboratorial. O processo fornece um produto aglomerado, com teor em ferro de 70%, que conforme os autores pode substituir parte da sucata no processo dos conversores LD da Aciaria. A Tabela V indica as características das matérias primas possíveis de utilização para a produção de aglomerados.

Tabela V – Características das matérias primas (%)⁽⁹⁾.

RESÍDUOS	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Fe t	FeO	Fe	C	Zn	Umid.
Pó sistema 7 Aciaria	1,11	0,32	3,74	0,44		62,39					1
Lama fina Aciaria	1,76	0,11	9,09	2,67	70,9	61,49		10,62	0,2	0,80	45
Pó sistema 6 Aciaria	8,58	30	10,4	8,36		7,26					1
Pó de BH Aciaria	2,30	0,5	12,7	1,60	75	52,50			0,2	0,30	1
Lama ETE LTQ2	1,10	0,9	0,10	0,20	85,7	60,00			9,0	0,05	55
Pó sala corrida	2,90	3,5		1,10	89,4	62,60				0,07	0,5
Lama ETEQ	4,76	0,74	9,36	1,41	43,9	35,00	5,52	0	5,0	0,08	50
Carepa	0,39	0,13	0,23	0,02	32,4	73,80	65,70	0,27	0,7	0,06	5
Pó de coletor	8,30	1,61	11,8	0,82	26,8	29,32	13,50	0,14	23		8
Pó de cal			95,0								0,5
Pó precip. primário	8,00	2	11,0	1,50	58	43,0	3,00	0,01	3		1
Pó varr. Casa est. AF											0,5
Lama de Alto Forno	12,00	3,5	18,7	3,50	43,8	46,86	12,00	7,80		0,11	30
URA PR					98						1

A mistura experimentada apresentou a proporção indicada na Tabela VI, sendo as pelotas produzidas numa planta piloto de pelotização, conforme fluxo de produção mostrado na Figura 9.

Tabela VI - Proporção experimentada ⁽⁹⁾

Matéria prima	Proporção (%)
URA Paraná (resíduo da Unidade de Regeneração Ácida = 98% Fe ₂ O ₃)	20
Concentrado de ferro	50
Concentrado de carbono	25
Cal recuperada de despoieramento	5

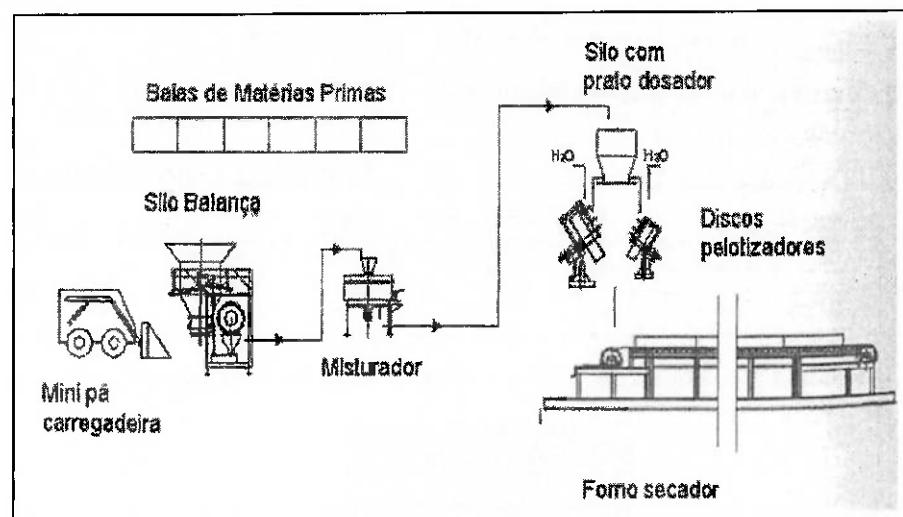


Figura 9 – Fluxo de produção ⁽⁹⁾

As pelotas apresentaram resistência suficiente para manuseio e transporte até um forno piloto de sinter do laboratório para queima, após o que foram realizadas análises químicas para determinação de suas características, demonstradas na Tabela VII.

Tabela VII – Características do aglomerado metálico ⁽⁹⁾

Características do aglomerado obtido						
Produto	Fe (metálico)	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	CaO	C
Aglomerado	58,4	12,8	16,2	3,1	5,6	0,5

Os autores concluíram que o processo mostrou-se:

- bastante eficiente também para eliminação do zinco presente nas matérias primas.

- promissor na utilização de resíduos gerados nos processos siderúrgicos para a fabricação de pelotas indicando a possibilidade de montagem de uma planta industrial.
- com resultados que habilitam o prosseguimento dos testes na Aciaria, como complemento da carga dos conversores LD.

4.7 Processamento de pelotas auto-redutoras

Vieira et al. ⁽¹⁰⁾ descreveram os resultados de utilização de resíduos aglomerados em pelotas auto-redutoras com alto teor de carbono, adicionadas em carros torpedo para incorporação no gusa dos Altos Fornos.

A mistura para composição das pelotas é mostrada na Tabela VIII, em base seca, onde a relação carbono fixo / óxidos de ferro visada foi 0,21.

Tabela VIII– Composição das pelotas testadas ⁽¹⁰⁾

Matéria prima	Proporção (%)
URA Paraná (resíduo da Unidade de Regeneração Ácida = 98% Fe ₂ O ₃)	20
Carepa	20
Resíduos de moínha de coque	20
Pó de precipitador eletrostático	40

Com os resultados dos testes laboratoriais e melhorias introduzidas, definiu-se uma rota tecnológica de aplicação das pelotas auto-redutoras, registrando-se metodologia e processo como patente industrial.

A Figura 10 mostra o diagrama dos equipamentos usados na unidade de pelotização de resíduos, onde: 1 = silo balança; 2 = misturador; 3 = silo dosador; 4 = prato pelotizador; 5 = forno secador.

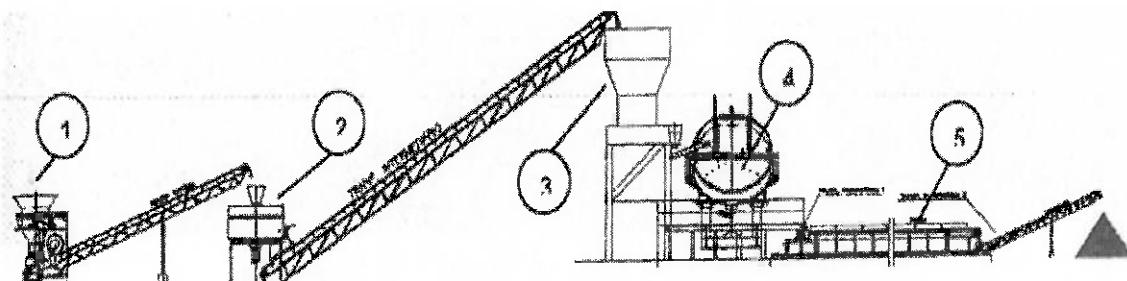


Figura 10 - Diagrama da planta piloto de pelotização de resíduos ⁽¹⁰⁾.

De acordo com a Figura 11, no processo desenvolvido, a pelota auto-redutora é obtida sem moagem de matérias primas: [1] a fonte principal de calor é derivada do

calor sensível disponível no revestimento refratário do carro torpedo, que retorna vazio da Aciaria; [2] parte do carbono contido também contribui para o aquecimento, elevando rapidamente a temperatura da pelota; [3] que permite o processo de redução/fusão; [4] gerando ferro metálico líquido, incorporado ao gusa carregado do alto forno.

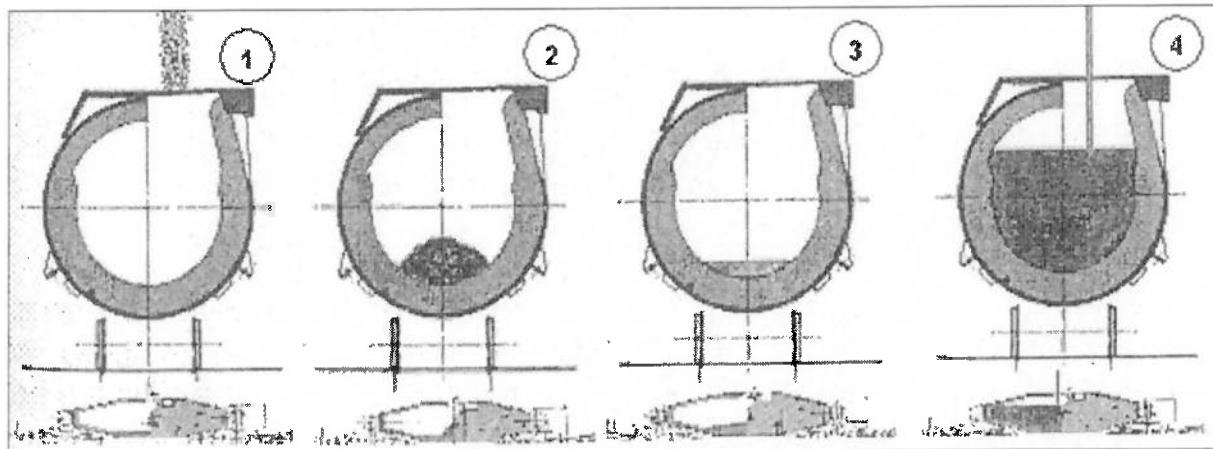


Figura 11 - Seqüência simplificada do processo de adição de pelotas auto-redutoras⁽¹⁰⁾

Num teste preliminar de adição, 02 toneladas de pelotas auto-redutoras foram carregadas num carro torpedo, não sendo observada nenhuma emissão significativa e, após 40 minutos, na descarga do torpedo, foi verificado que ocorreu fusão/redução do material.

O teste industrial de carregamento contínuo foi feito com a seleção de um carro torpedo para carregamento durante 30 dias. Nesse período não foi verificado nenhuma anormalidade no revestimento refratário e as temperaturas da carcaça do torpedo permaneceram dentro das expectativas de utilização. Ainda mais, a comparação entre carros torpedo sem adição de pelotas demonstrou que a adição delas não causou nenhuma influência específica no torpedo testado, não havendo interferência na qualidade do gusa.

4.8 Tendências tecnológicas em usinas siderúrgicas do exterior

Mourão⁽¹¹⁾ relatou tendências tecnológicas na reciclagem de pós e lamas contendo ferro. Tais materiais possuem ferro metálico e oxidado, carbono, cal e outros componentes de escórias, em proporções e granulometrias diversas, além de zinco e álcalis.

Considera que o processo mais simples seja adicioná-las na mistura a sinterizar, porém, com o problema de piorar a qualidade do sinter. Assim, aponta como possíveis soluções para aumentar a utilização desses resíduos as seguintes alternativas:

- aumentar a capacidade da sinterização de absorver os resíduos.
- injetar pós pelas ventaneiras dos altos fornos.
- adicionar no conversor.
- usar como matéria prima em outras indústrias.
- separar numa planta de tratamento de resíduos, na qual se possa produzir, por exemplo, ferro a partir do resíduo tratado.

Este autor considera que alternativas de uso de pelotas auto-redutoras em forno de cuba modificada (processo Tecnored) ou forno de soleira rotativa (processo Fastmet) implicam em altos investimentos.

Ao mesmo tempo, indica como propostas inovadoras o uso de pelotas auto-redutoras em carro torpedo em trânsito, vazio, conforme citado anteriormente, segundo experiências da CSN; o uso de pelota auto-redutora em Alto Forno, desenvolvimento da Nippon Steel, porém, com piora da performance do forno; o uso de briquete no conversor a oxigênio, conforme experiência da Arcelor/Mittal Tubarão.

4.8.1 Recuperação da lama de alto forno na China Steel Co. (CSCo)

Hung et al. ⁽¹²⁾ relataram que um total de 43.000 t de lama (base seca) são geradas nos três Altos Fornos da CSCo. A lama do alto forno, contendo ferro e carbono é valiosa e precisa ser recuperada. Entretanto o conteúdo de impurezas e sua densidade apresentam dificuldades para a reciclagem direta. Um sistema de classificação úmido foi instalado para permitir a remoção de zinco e a utilização efetiva dessa lama.

Nesse sistema, a lama do alto forno é classificada por dois estágios de hidrociclos e separada em duas frações: o “underflow” que contém maior proporção de partículas mais grosseiras e o “overflow” onde se concentram as partículas de menores dimensões.

O “underflow”, pó grosso, que contém menor teor de zinco, passa por filtros a vácuo e o pó pode ser recuperado na planta de sinterização. A fração “overflow”, rica

em zinco, filtrada por meio de filtro-prensa, é enviada para plantas de produção de cimento.

Os autores comentam que, nos anos 1970, a redução térmica era o processo usado para reduzir as impurezas nas lamas e pós de altos fornos (e também de conversores LD da Aciaria). Nesse processo os resíduos ferrosos com finos de coque como redutor eram secados e alimentados em reator a alta temperatura como, por exemplo, um forno rotativo à temperatura de 1100 °C. Embora o método ofereça excelente recuperação do óxido de ferro e remoção do zinco, sua instalação pode não ser viável devido aos altos custos de montagem, operação e controle do meio ambiente. Observam ainda que a redução térmica pode ser mais conveniente para o tratamento de poeiras com altos teores de zinco, como as que são geradas por aciarias com fornos elétricos a arco.

Já o processo de classificação a úmido, denominado Hoogovens, foi desenvolvido com êxito. Os estudos demonstraram que maior parte do zinco e do chumbo estão concentrados na fração mais fina da lama dos altos fornos, que pode ser classificada por hidrociclone e direcionada para a indústria cimenteira. A Tabela IX indica as taxas médias de recuperação e de remoção do zinco (% em peso) para cada unidade de separação na CSCo.

Tabela IX – Taxas de recuperação e remoção da lama de altos fornos ⁽¹²⁾

Alto Forno	Material	Taxa recuperação ou remoção (% em peso)
1 / 2	Recuperado	76
	Removido	82
3	Recuperado	61
	Removido	83

Observe-se que a menor recuperação para a lama do alto forno 3, conforme os autores, foi devida ao tamanho irregularmente pequeno do pó suprido. No total, a recuperação média da lama foi de 69% e a taxa de remoção de zinco alcança uma média de 83%. A Figura 12 mostra o sistema de separação instalado na CSCo.

Comparado com o processo anterior de redução térmica, a classificação a úmido apresenta algumas características e vantagens que podem ser resumidas em:

- Processo de separação física, não envolvendo reação química.
- Operação a úmido realizada com facilidade e limpeza.
- Baixo custo de instalação e engenharia.

- Eficiência inferior na recuperação da lama e remoção do zinco.

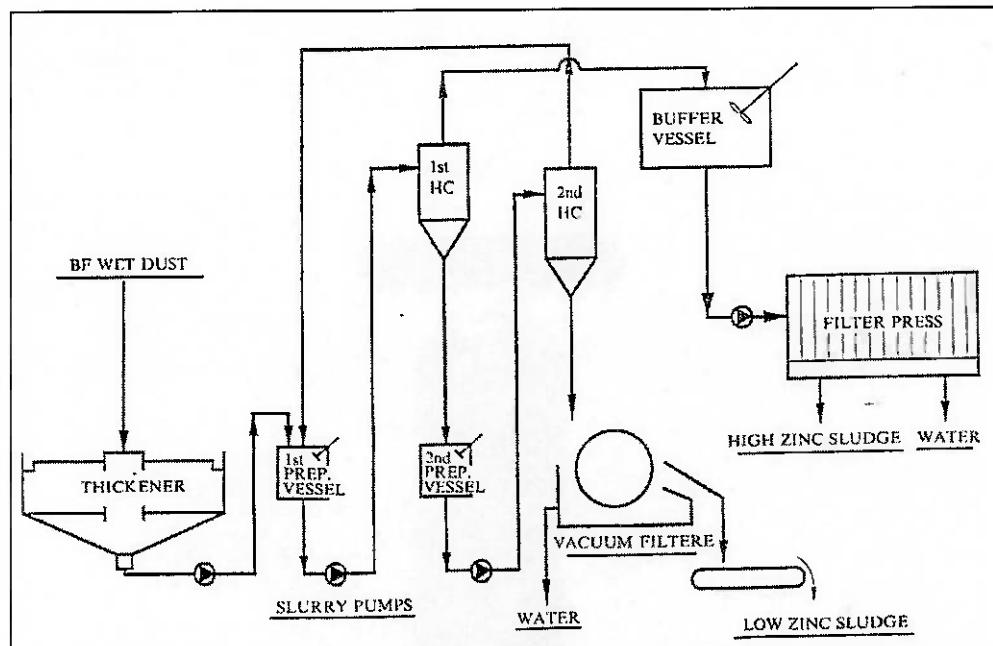
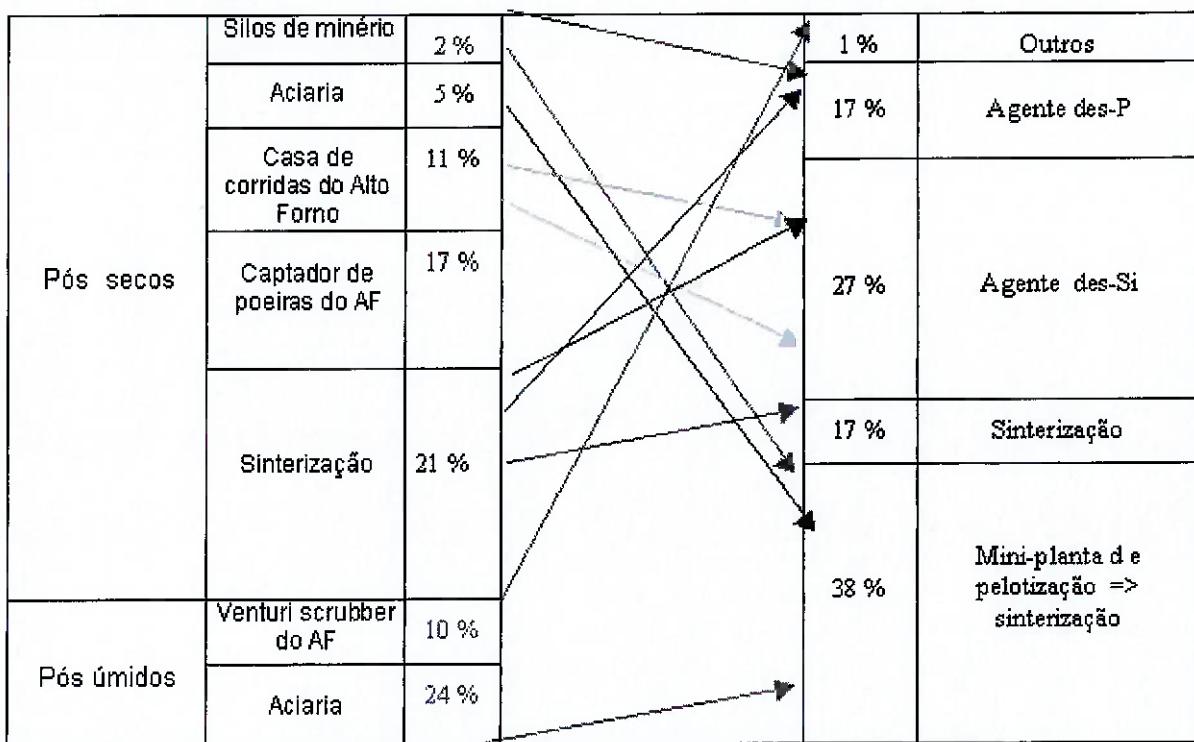


Figura 12 – Sistema de classificação da lama dos Altos Fornos na CSCo⁽¹²⁾.

4.8.2 Projeto “Resíduo Zero” na Usina de Mizushima da Kawasaki Steel

Na Tabela X encontra-se o local de geração dos pós e sua utilização, indicando que 44% dos pós gerados são usados no pretratamento do gusa líquido, como agentes na dessiliciação e na desfosforação, enquanto os 55% restantes são reciclados diretamente ou por via de mini-planta de pelotização, na sinterização.

Tabela X - Geração e utilização de pós na usina de Mizushima, KWS ⁽¹³⁾.

4.8.3 Realizações da Posco para reciclagem de lama:

A lama é o resíduo mais difícil de ser recirculado numa usina siderúrgica, além de exigir grandes investimentos para tratamento sem riscos ambientais. Esta usina tem feito esforços para reduzir a disposição em aterros e reciclar de maneira econômica e ambientalmente favorável esse resíduo sólido.

A lama de alto forno com baixo teor em zinco é reciclada na sinterização; a que contém alto teor em zinco é reciclada como matéria prima para a produção de cimento.

De acordo com Jang-Gon Jeon e Soo-Jong Jin ⁽¹⁴⁾ a lama do alto forno era um resíduo destinado à reciclagem na sinterização, porém, existiam problemas não solucionados devidos aos teores de zinco. Quando a lama virgem com teor médio de 1,2% Zn era usada como matéria prima na sinterização, o nível bruto de zinco carregado aumentava no alto forno. Então, como esse elemento tem baixo ponto de fusão ($419,6^{\circ}\text{C}$), parte do mesmo sublima nas altas temperaturas do alto forno, solidificando-se no topo (cascão). Com o tempo, o acúmulo de zinco faz com que o cascão se desprenda do topo, causando estragos nas paredes refratárias e perda de produção. Além disso, os autores consideram um efeito adverso pelo aumento de geração de poeira, prejudicial à descida da carga e aumento do custo de

combustível. Desta maneira, a Posco adotou a deszincagem, resolvendo o problema associado a esse metal.

O processo de deszincagem separa partículas grossas e finas por um sistema de hidrociclone (Figura 13), baseado no princípio de que o conteúdo de zinco é maior nas partículas finas do que nas grossas (Figura 14).

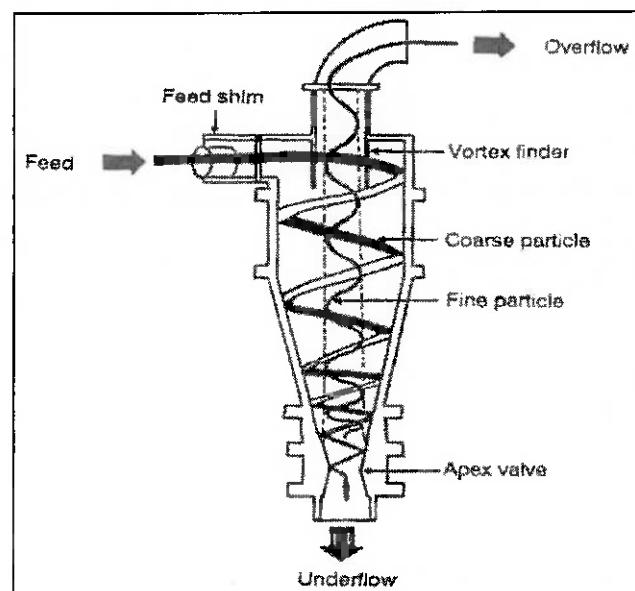


Figura 13 – Diagrama esquemático do hidrociclone (14)

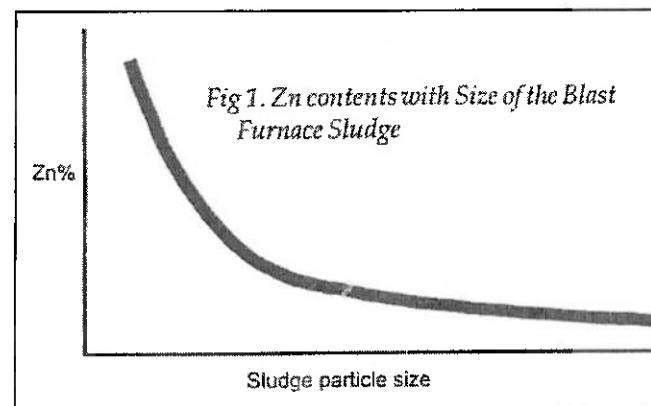


Figura 14 – Conteúdo de zinco conforme tamanho das partículas da lama de alto forno (14).

A operação eficiente de deszincagem alcança 82 a 90%. Conteúdos de zinco em lamas de baixo teor e de alto teor são, respectivamente, 0,3% e 2,5%. A de baixo teor é 100% reciclada na sinterização da Usina de Pohang, enquanto que na Usina de Kwangyang é carregada no alto forno sob a forma de pelotas aglomeradas a frio. A lama de alto teor em zinco (3 a 5% Zn) era colocada em aterros controlados até 2001. A partir dessa data, a Usina de Pohang criou uma nova demanda para esse resíduo na indústria cimenteira. Foi desenvolvido um produto que, basicamente, é

uma mistura da lama com alto teor em zinco mais pó de alto forno (com conteúdo de 50% de ferro), que veio substituir os minérios de ferro usados em indústria do cimento.

A Figura 15 apresenta o diagrama de reciclagem para a lama de alto forno, na Usina de Pohang (Posco, Coréia).

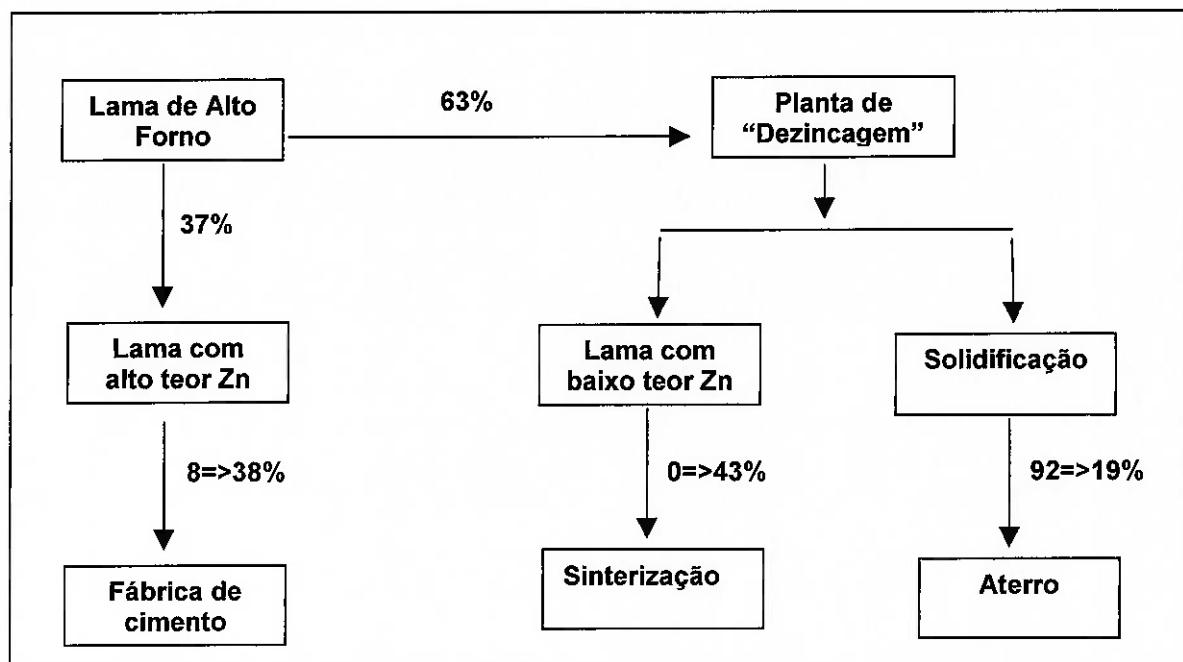


Figura 15 – Diagrama de reciclagem da lama de Alto Forno ⁽¹⁴⁾.

4.9 Outras alternativas de uso e aplicações para a lama de altos fornos

4.9.1 Na agricultura: existem casos desses resíduos serem aplicados diretamente no solo para a plantação de milho que servirá de ração para gado leiteiro.

O processo já comentado de separação do óxido de zinco a partir das lamas geradas, separa frações ricas em óxido de ferro e em carbono, recicláveis no processo siderúrgico, enquanto a fração que concentra o óxido de zinco não possui um destino definido. A Tabela XI apresenta as concentrações do zinco na lama e no resíduo separado, conforme informado por Andrade ⁽¹⁵⁾.

Tabela XI – Teores totais de Fe, Zn, Pb e Cd na lama de alto forno de usina integrada e lama concentrada de zinco após tratamento⁽¹⁵⁾.

Material	%Fe	%Zn	%Pb	%Cd
Lama AF	57	0,8	0,15	0,003
Conc Zn	14	3,1	1,5	0,05

No seu estudo sobre o concentrado de zinco, Andrade⁽¹⁵⁾ avaliou os efeitos da adição desse resíduo como fonte de zinco (micronutriente) para suprimento da cultura de arroz sem contaminar o solo e nem o vegetal cultivado e aos seus grãos com cádmio e chumbo. Os níveis desses elementos não podem superar ao estabelecido para normas legais de contaminação do solo, nem aos níveis estabelecidos como críticos para os alimentos. A utilização do resíduo permitiria atender a uma crescente demanda de mercado, além de permitir um destino mais adequado para o mesmo.

Concluiu que o resíduo foi eficiente como fornecedor de zinco para cultura de arroz desenvolvida em solos com pH maior que 5,5; houve maior acúmulo de zinco e chumbo nas raízes da planta, enquanto o cádmio concentrou-se na parte aérea; não houve concentração de chumbo e cádmio nos grãos e zinco estava na faixa normal. Entretanto, pelas características apresentadas nos solos estudados e pela fitotoxicidade do chumbo, não se recomenda o uso do resíduo concentrado em zinco para a cultura do arroz.

4.9.2 No setor cerâmico: os resíduos pó de coletor e lamas de alto forno são incorporadas à massa de argila, auxiliando na coloração dos tijolos, graças à quantidade de óxido de ferro que possuem, contribuindo ainda com ganho energético de até 50% no processo. Entretanto, a quantidade de pó de coletor não pode ser aumentada indefinidamente, pois, a qualidade final dos produtos diminui pelo aumento da porosidade, diminuição da resistência mecânica e aumento da absorção de umidade. A indústria cerâmica usa proporções da ordem de 10%, em volume, adicionado à argila, conforme informado por Almeida et Melo⁽¹⁶⁾.

A Siderúrgica Arcelor/Mittal Tubarão – Aços Planos comercializa para a indústria cerâmica de tijolos e telhas, o resíduo lama de alto forno. Conforme Rossi⁽¹⁷⁾ essa lama é co-produto gerado após a etapa de lavagem dos gases de Alto Forno, tendo as referências apresentadas na Tabela XII.

Tabela XII – Referências para a lama de alto forno da Arcelor/Mittal – Tubarão (ES)⁽¹⁷⁾

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)		CARACTERÍSTICAS FÍSICAS
SiO ₂	4,92	Granulometria (%)
CaO	3,76	0,150 mm = 3,30
Al ₂ O ₃	1,82	0,075 mm = 11,70
MgO	0,64	0,045 mm = 15,70
MnO	0,32	0,038 mm = 10,40
Fe ₂ O ₃	41,76	< 0,038 mm = 59,50
C	37,20	UMIDADE (%) 25%, aproximadamente
Zn	0,84	
Fe Mn	1,74	
S	0,61	

A Siderúrgica do Grupo Arcelor/Mittal comenta que a indústria cerâmica é tradicional consumidora da lama de alto forno. A Figura 16 mostra o fluxo de gestão de resíduos e co-produtos na área de produção de gusa na Usina de Arcelor/Mittal – Tubarão.

A incorporação da cerâmica vermelha apresenta-se como uma das principais soluções tecnológicas para a disposição final dos resíduos sólidos industriais e municipais. A variabilidade natural das características das argilas associada às técnicas de processamento relativamente simples e, ainda, a baixa performance exigida para os produtos permitem a presença de níveis de impurezas relativamente elevados.

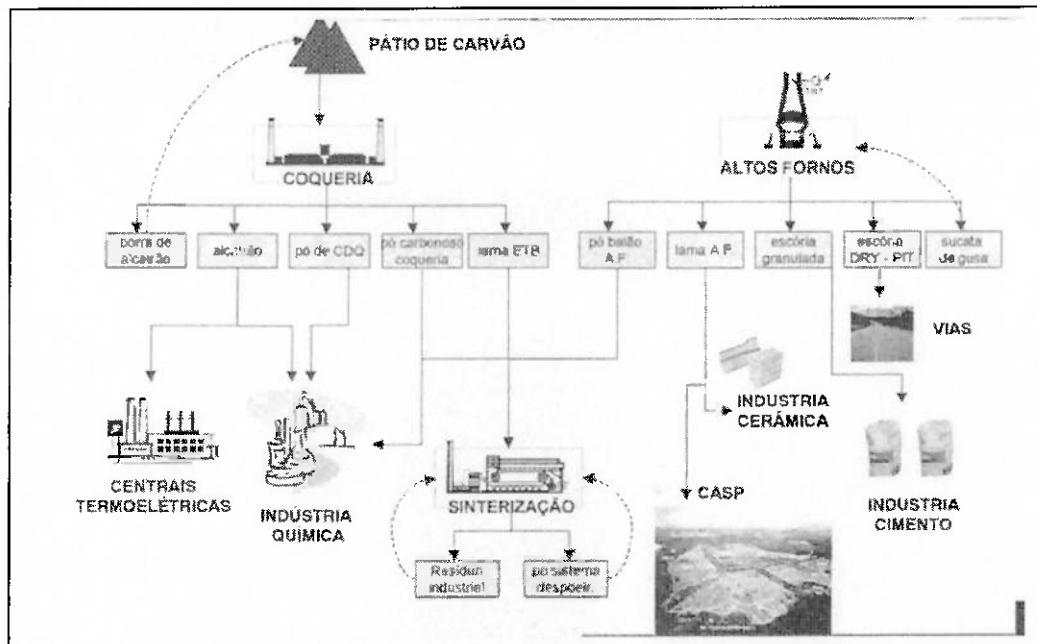


Figura 16 – Fluxo de Gestão de resíduos e co-produtos na área de gusa da Arcelor/Mittal Tubarão.

Nota: CASP = Destinação Temporária adequada

Vieira et al. ⁽¹⁸⁾ caracterizando e avaliando a influencia da incorporação de lama de alto forno, proveniente de uma siderúrgica integrada, nas propriedades e microestrutura de uma massa argilosa queimada a 900 °C e usada na fabricação de cerâmica vermelha, concluíram que:

- A granulometria é adequada para incorporação em cerâmica vermelha.
- Resíduo contribui para aumentar a absorção da água, reduzir a tensão de ruptura à flexão e aumentar a retração linear da cerâmica queimada. Este comportamento é atribuído à composição mineralógica do resíduo, pois, a hematita permanece inerte durante a queima e os finos de coque aumentam a porosidade da cerâmica.
- Baseados nos resultados, a lama de alto forno deve ser incorporada em percentuais abaixo de 5%, em peso, minimizando os efeitos deletérios nas propriedades físicas e mecânicas da cerâmica.

A Tabela XIII traz a composição química da lama de alto forno experimentada:

Tabela XIII – Composição química da lama de alto forno usada em cerâmica vermelha⁽¹⁸⁾.

Composto	(%)
SiO ₂	4,94
Al ₂ O ₃	2,22
Fe ₂ O ₃	57,91
TiO ₂	0,12
CaO	2,97
MgO	0,77
K ₂ O	0,29
Na ₂ O	1,18
ZnO	0,51
MnO	0,54
P ₂ O ₅	0,15
SO ₃	1,89
PF	26,22

Observe-se na Tabela XIII que o elevado valor de perda ao fogo (PF) deve estar associado, sobretudo, à combustão dos finos de coque. Esta característica promove calor adicional na etapa de queima da cerâmica, acarretando economia de gasto em energia, conforme ressaltaram Vieira e colaboradores⁽¹⁸⁾.

4.9.3 Adsorção de metais pesados : a literatura registra estudos do emprego de compostos de ferro como material adsorvedor não convencional para remoção de metais pesados de efluentes industriais. Foram testados os empregos de hematita, lodo galvânico e lama de alto forno.

Principalmente, o processo de adsorção física de Pb⁽²⁺⁾ mostrou que a lama do alto forno tem alta capacidade de adsorção, superior a 80 mg de chumbo por grama de lama. As análises sugerem que o processo de adsorção física ocorre, principalmente, através da troca do íon Pb⁽²⁺⁾ por outros íons, tais como o Ca⁽²⁺⁾. As técnicas existentes para recuperação de ferro e de chumbo metálico (ou óxido de chumbo) da lama, são alternativas interessantes para inertizar resíduos tóxicos e perigosos.

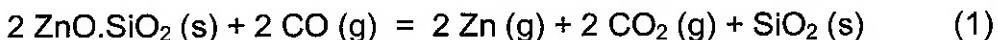
4.10 A influência do zinco e de álcalis contidos nos resíduos siderúrgicos

A experiência acumulada sobre o comportamento de elementos e compostos voláteis no interior do alto forno é baseada na forma com que estes compostos são encontrados na natureza, por exemplo, silicatos de zinco, de potássio e de sódio. A necessidade de reciclar resíduos da produção do aço implicou em análises sobre o comportamento desses elementos que, nos resíduos siderúrgicos, são encontrados sob a forma de óxidos.

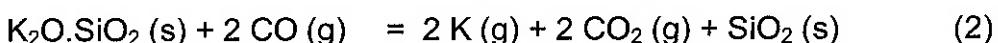
Já foi mencionada a imposição de restrições para a reciclagem destes elementos voláteis porque causam problemas operacionais, como deterioração da marcha operacional, formação de cascões, elevada reatividade do coque, inchamento das pelotas, etc, conforme descrito por Figueira⁽¹⁹⁾.

Esses fenômenos resultam do comportamento termodinâmico destes elementos e seus compostos em relação às temperaturas e gases encontrados no interior do alto forno, à medida que descem com a carga.

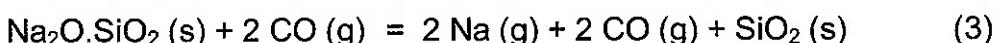
Quando contidos nos minérios na forma de silicatos, as reações de redução são:



$$\Delta G^\circ = -396.953 + 220,59 T \text{ (J/mol)}$$

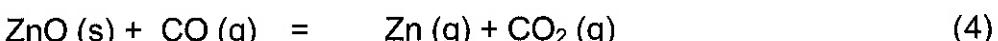


$$\Delta G^\circ = 28.912 - 11,48 T \text{ (J/mol)}$$

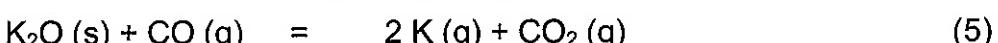


$$\Delta G^\circ = 31.792 - 11,85 T \text{ (J/mol)}$$

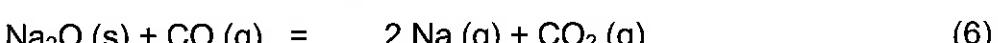
Quando a redução ocorre a partir dos óxidos, tem-se:



$$\Delta G^\circ = -180.686 + 110,30 T \text{ (J/mol)}$$



$$\Delta G^\circ = 11.215 - 9,57 T \text{ (J/mol)}$$



$$\Delta G^\circ = 12.907 - 8,11 T \text{ (J/mol)}$$

Considerando atividades dos silicatos e dos óxidos unitários e os valores de energia livre padrão das reações acima, calcula-se a composição do gás formado por CO e CO₂, em equilíbrio com os compostos e vapores de zinco, potássio e sódio. A Figura 17 mostra as relações CO / CO + CO₂ calculadas e a composição do gás no interior do alto forno⁽¹⁹⁾.

Existe um deslocamento para a esquerda das curvas referentes aos óxidos, demonstrando a menor estabilidade termodinâmica dos mesmos em relação aos silicatos.

Os pontos onde as curvas dos gases do alto forno cortam as curvas do composto indicam, a temperatura de início da redução desse composto. Então as temperaturas de redução dos óxidos são menores que as dos silicatos.

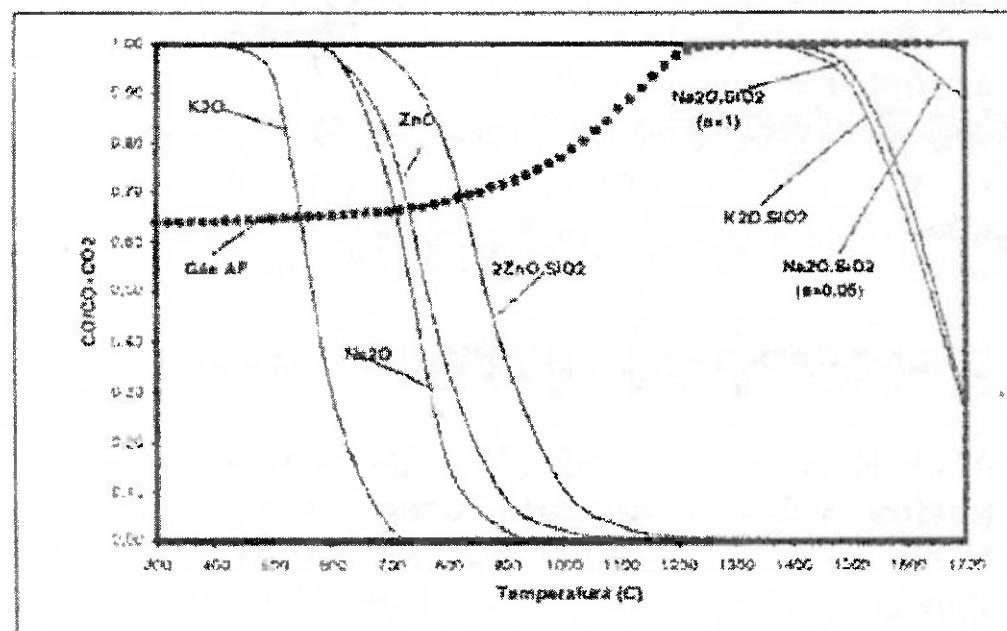


Figura 17 – Equilíbrio entre CO, CO₂, óxidos e silicatos de Zn – K – Na⁽¹⁹⁾.

Desta maneira, o conhecimento do comportamento dos elementos voláteis e seus compostos tem grande importância na reciclagem de resíduos no alto forno:

4.10.1 Compostos de zinco: ao atingirem a temperatura mínima de redução, são reduzidos e o vapor resultante sobe junto com os gases em direção ao topo. Durante esse percurso, a solubilidade do zinco gasoso no gás diminui; uma parte se condensa nos refratários e outra parte, na própria carga. Esta parte é novamente vaporizada a níveis mais baixos e retorna ao ciclo. O restante do zinco vaporizado, depositado no refratário, forma um composto de baixo ponto de fusão, dando início à formação de cascões.

O fato do óxido de zinco ter temperatura de início de redução (730 °C) mais baixa que o silicato (830 °C), desloca a região de circulação para a parte superior do alto forno. Isto permite que, através de mudanças operacionais, seja elevada a

temperatura do topo, possibilitando remover a maior parte do zinco junto ao gás do Alto Forno, evitando-se o ataque aos refratários.

Portanto, é possível reciclar resíduos siderúrgicos no alto forno, apesar dos teores em zinco serem elevados.

4.10.2 Compostos de potássio: assim como o zinco, passam também por um processo de recirculação dentro do alto forno. Entretanto, devido a maior estabilidade termodinâmica do silicato de potássio em relação ao de zinco, a região de recirculação situa-se a níveis mais baixos, próximo das ventaneiras. Para situações nas quais este silicato esteja dissolvido na escória primária, a curva é deslocada para a direita, elevando-se a temperatura de redução.

Quando carregado na forma de óxido, com a temperatura de redução mais baixa ($1310 \Rightarrow 550^{\circ}\text{C}$) e a não incorporação à escória primária, deve-se esperar problemas mais sérios quanto à formação de cascões e ataque ao revestimento refratário.

4.10.3 Compostos de sódio: diversos balanços de álcalis realizados em altos fornos indicam que o sódio é, praticamente, todo eliminado através da escória, certamente devido à maior estabilidade de seu silicato em relação aos silicatos de zinco e de potássio, com sua incorporação à escória primária e redução de sua atividade.

As temperaturas de redução do silicato de sódio dissolvido na escória são bem superiores a 1400°C , o que facilita sua remoção pela escória.

O mesmo não acontece quando o sódio é carregado na forma de óxido. A temperatura de redução é reduzida (710°C), o que impede sua incorporação à escória primária antes da vaporização. Assim é de se esperar que uma recirculação de sódio também ocorra no interior do Alto Forno, causando uma série de problemas operacionais.

5 DISCUSSÃO

5.1 Caracterização da lama de alto forno na Cosipa

Pelo exposto na revisão bibliográfica, entende-se que as atividades siderúrgicas sejam responsáveis pela geração de uma grande variedade e quantidade de resíduos possíveis de reciclagem, sendo que a maioria desses materiais ainda está sendo estudada.

Devido à crescente preocupação com questões ambientais, várias indústrias passaram a investir em novas alternativas para solucionar os problemas decorrentes da geração e disposição de resíduos.

Nos 10 primeiros meses de 2007, a COSIPA produziu 2,68 milhões de toneladas de resíduos, com média de 765 kg por tonelada de aço bruto. Em se tratando dos resíduos gerados a partir do sistema de despoieiramento e lavagem dos gases de alto forno – pó de coletor e lamas de alto forno – há excelente potencial de aproveitamento após beneficiamento. Um deles é rico em carbono com elevado valor agregado; outro, rico principalmente em óxidos de ferro, pode ser reciclado na carga do alto forno, após redução dos teores de zinco a valores compatíveis com a aplicação, conforme citado na bibliografia revisada.

Essas lamas são classificadas como resíduos não perigosos, classe II A⁽²⁰⁾, cuja deposição em pátios de resíduos deve ser realizada seguindo-se as normas ambientais pertinentes. A Tabela XIV mostra a caracterização dessa lama em suas duas frações: fina (LAFFF) e grossa (LAFFG).

No período considerado, a geração de pó foi 13,4 kg/t gusa e de lama de alto forno, 12,5 kg/t gusa. Assis et al.⁽²¹⁾ informaram que a geração de pó e de lama por tonelada de gusa estão, respectivamente, entre 5 a 30 kg/t e entre 1 a 20 kg/t. Indicaram também que o pó pode ser empregado na injeção de finos através das ventaneiras, bem como no processo de sinterização. A lama apresenta algumas restrições devido aos teores de zinco, chumbo e ácalis.

Entre os métodos de pretratamento, a ciclonagem talvez seja a técnica mais simples e energeticamente eficiente, embora sua limitação para eliminar o zinco, conforme já mencionado.

Tabela XIV – Caracterização da lama de alto forno na COSIPA.

RESÍDUO	LAFFF	LAFFG
Geração (t / mês)	2.700	1.200
Tipo	lama	Lama
Reciclagem comum	-	-
Densidade (t / m³)	1,97	2,29
Umidade (%)	24,0	20,0
Análise Química (base seca) (%)		
C	22,45	14,82
Fe (total)	25,58	33,02
Cão	1,57	2,23
SiO ₂	15,00	12,00
Al ₂ O ₃	1,34	0,83
MgO	0,85	0,69
MnO	0,34	0,28
Na ₂ O	0,28	0,12
K ₂ O	0,45	0,29
Zn	0,25	0,04
S	0,17	0,17
Pb	0,15	0,01
Granulometria (mm)		
7,93	2,4	2,6
6,35	0,6	1,0
4,76	1,9	2,0
3,36	2,1	2,1
1,41	7,3	4,0
1,00	1,3	1,4
0,84	1,4	1,4
0,59	0,8	1,9
0,297	2,1	8,5
0,149	9,4	20,2
0,105	8,6	12,8
0,074	23,4	19,8
Abaixo	38,6	22,3

5.2 A reciclagem da lama de alto forno

A Tabela XV apresenta a destinação comum da lama de alto forno, conforme Tardy e Mezei apud Takano et al. ⁽²²⁾.

Tabela XV – Destinação da lama de alto forno ⁽²²⁾

Resíduo	Destino	Observação	% Fe	Alternativa de reciclagem
Pó de Coletor	100% sinterização	Diminui rendimento	41 % (%C = 26)	Em Aciaria ou DRI como redutor
Lama de alto forno	50% sinterização em função teor em zinco	Diminui rendimento	37 % (%C = 30)	Em Aciaria ou DRI como redutor

Estes pesquisadores ⁽²²⁾ ainda avaliaram os comportamentos a frio e a quente de pelotas e briquetes auto-redutores de diversas composições, empregando finos de resíduos sólidos gerados na COSIPA. Os resultados técnicos, associados ao comportamento das misturas ensaiadas, indicaram que tais aglomerados podem ser reaproveitados na Aciaria.

As primeiras experiências de uso de briquetes nos conversores da aciaria da COSIPA foram descritas por Lenz e Silva ⁽²⁵⁾, quando usaram-se briquetes produzidos com resíduos da Arcelor/Mittal – Tubarão (CST), em sua unidade de reciclagem (Vitória/ES).

Segundo o autor, as experiências apresentaram resultados satisfatórios, tanto do ponto de vista operacional (manuseio, carregamento, ensilamento, degradação, etc), como do ponto de vista de processo metalúrgico de refino primário.

A caracterização química dos briquetes CST é mostrada na Tabela XVI.

Tabela XVI – Caracterização química dos briquetes CST ⁽²⁵⁾

BRIQUETE CST	%SiO ₂	%Ca O	%Al ₂ O ₃	%Fe _T	%S	%P ₂ O ₅	%C _{total}	Basicid.
	2,31	9,74	0,55	69,20	0,03	0,07	2,33	4,21

Os briquetes ensilados foram adicionados no início de cada corrida, após a carga de sucata, aproveitando o calor no interior do conversor e a disponibilidade de carbono e silício provenientes do gusa líquido, capazes de reduzir parte dos óxidos de ferro contidos nos briquetes.

Não foram observadas reações, explosões ou “splashing” anormais, ratificando a possibilidade de reciclar parte de resíduos siderúrgicos como carga sólida nos conversores.

Lenz e Silva ⁽²⁵⁾ definiu as principais condições de contorno para a elaboração de briquetes destinados à aciaria:

- Maximizar a recuperação de Fe_T e metálico nos resíduos.
- Minimizar a presença de elementos deletérios.
- Minimizar a umidade.
- Trabalhar em condições básicas.
- Consumir a geração de resíduos e o passivo ambiental.

Estas condições de contorno e as especificações para briquetagem estão resumidas na Tabela XVII.

Tabela XVII – Condições de contorno e especificações do cenário de briquetagem ⁽²⁵⁾

RESUMO	LIMITE INFERIOR DE ESPECIFICAÇÃO	LIMITE SUPERIOR DE ESPECIFICAÇÃO	CONDIÇÃO DE CONTORNO
(%) Umidade	2,0	3,0	Minimizar
(%) Álcalis		< 0,35	Minimizar
(%) Fe total	65,0	80,0	Maximizar
(%) C	1,7	< 5,5	Minimizar
Basicidade	3,5	4,5	
(%) S	0,040	0,085	Minimizar
(%) Zn		< 0,015	minimizar
(%) P ₂ O ₅	0,085	0,015	Minimizar

A seguir, Malynowskyj et al. ⁽²⁶⁾ avaliaram o desempenho operacional da adição de briquetes nos conversores da Aciaria, antes da amostragem da sublança como elemento refrigerante do sopro, substituindo o sinter nesta função.

Os briquetes “cosipa” foram fabricados externamente, com lama de aciaria fração grossa (LOGFG), carepa de laminação de chapas grossas (CLCG), pó de despoeiramento eletrostático da sinterização 3 (POPES3), cal e melaço, nas quantidades mostradas na Tabela XVIII ⁽²⁶⁾.

Tabela XVIII – Geração e análise química de resíduos usados na fabricação de briquetes “cosipa” experimentados na aciaria⁽²⁶⁾

RESÍDUO	UMIDADE (%)	GERAÇÃO				BRIQUETES “COSIPA”	
		Mensal (t)	Anual (t)	Base Seca (t)	% em Massa	Consumo base seca	
LOGFG	11,0	2.000	24.000	21.360	36,67	21.360	
CLCF	10,6	1.000	12.000	10.728	18,41	10.728	
POPE S3	6,0	1.700	20.400	19.176	32,92	19.176	
Cal	-	-	-	-	3,00	1.748	
Melaço	-	-	-	-	9,00	5.244	
TOTAL		4.700	56.400		100,00	58.256	

A Tabela XIX indica a análises químicas dos resíduos empregados e a análise estimada para o briquete “cosipa”.

Tabela XIX – Análises químicas de resíduos e do briquete “cosipa”.

Resíd.	RESÍDUO: COMPOSIÇÃO QUIMICA (%)								BRIQUETE: COMPOSIÇÃO QUIMICA ESTIMADA (%)							
	Fe _T	C	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Zn	S	Fe _T	C	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Zn	S
LOGFG	83,0	0,60	3,44	1,17	0,01	0,01	0,01	0,05	30,4	0,22	1,26	0,43	0,00	0,00	0,00	0,02
CLCG	73,9	0,60	0,03	0,31	0,01				13,6	0,11	0,01	0,06	0,00			
POPE S3	52,9	4,50	10,3	2,72	0,16	1,75		0,09	17,4	1,48	3,39	0,90	0,05	0,58		0,03
Cal	0,20		95,0	1,50				0,15	0,01		2,85	0,05				0,01
Melaço			1,12		0,27	2,89		0,50			0,10		0,02	0,26		0,01
Briquete “cosipa”: composição química estimada (%)								61,4	1,81	7,61	1,44	0,07	0,84	0,00	0,07	

As principais conclusões obtidas nessa segunda etapa de experiências podem ser resumidas em:

- Taxa de substituição do sinter pelo briquete no controle estático: 1,0 t de sinter por 1,38 t de briquete.
- Rendimento metálico do briquete idêntico ao do sinter usado no controle estático.
- Consumo de sinter para controle estático: média de 1,998 t por corrida.
- Incorporação do sinter e do briquete no banho: 57%.
- As variáveis consideradas estatisticamente iguais entre os processos com sinter e com briquetes foram:

- ✓ Carbono de fim de sopro.
- ✓ Fósforo de fim de sopro.
- ✓ Relação manganês de fim de sopro / carbono de fim de sopro.
- ✓ Temperatura de fim de sopro.
- ✓ Nitrogênio de fim de sopro.
- O briquete "cosipa" foi considerado como substituto eficaz do sinter adicionado no sopro do conversor, durante a etapa do controle estático.

Na análise sob o ponto de vista econômico da alternativa de uso briquetes "cosipa", considerou-se que para a produção de 4,5 Mt de aço/ano, conforme capacidade atual da COSIPA tem-se 28.846 corridas, que consumirão 59.445 t destes briquetes com 2% de umidade. Uma estimativa de benefícios e custos (R\$ / ano) pode ser calculada conforme o Anexo I, cujo resumo é indicado na Tabela XX.

Observe-se que resíduos CLCG e POPES3, não são comercializados pela empresa, são usados nas sinterizações. Com seu emprego nos briquetes, haverá a necessidade de compra de materiais que os substituam, tais como, minério de ferro fino, antracito e calcário fino.

Tabela XX - Estimativa de Custo x Benefício para a alternativa proposta.

Custo x Benefício (R\$ / ano)	
Benefício com redução de compra de pelotas	5.983.938,20
Benefício com a venda de placas adicionais	5.980.714,67
Benefício Total	11.964.652,87
Custos Totais	10.267.897,55
Resultado Econômico	1.696.755,32

A partir desses fatos e dados, vislumbrou-se o reaproveitamento das lamas geradas no alto forno, através da aplicação do processo de briquetagem e utilização dos briquetes em substituição ao sinter usado na Aciaria.

A literatura indica que na aglomeração por briquetagem é importante a resistência mecânica do briquete. Moraes e Cassola ⁽²³⁾ analisaram briquetes sem a adição de aglomerantes, concluindo que não apresentaram resistência mecânica suficiente para manuseio a verde ou a seco. Uma boa resistência à compressão foi obtida por estas autoras nos casos de briquetagem de finos de óxido de ferro, gerados por

indústrias siderúrgicas, com o emprego de ácido acético, porém, sugeriram a necessidade de estudar como minimizar o efeito higroscópio conferido ao material. Identificaram também outros aglomerantes potenciais, tais como cal hidratada, melaço e cimento.

Takano e colaboradores ⁽²²⁾, em suas experiências de reciclagem de finos de resíduos siderúrgicos sólidos, utilizaram cimento Portland do tipo de alta resistência inicial.

Além disso, sabe-se que a fração empregada para briquetagem está abaixo de 6,35 mm para a maioria dos casos, conforme Cunha et al. ⁽²⁴⁾.

A Tabela XXI indica a geração dos resíduos estudados para a aglomeração, o consumo e a produção de briquetes necessários para uma produção anual de $4,5 \times 10^6$ toneladas. Neste estudo, avaliou-se briquetes:

- B1- lamas de alto forno e de aciaria, moínha de coque e cimento;
- B2- lamas de alto forno e de aciaria, pó de coletor, carepa de laminação de chapas grossas e pó de sinterização.
- B3- lamas de alto forno e de aciaria, carepa de laminação de chapas grossas e pó de sinterização.

A Tabela XXII mostra as análises químicas dos resíduos empregados e as análises estimadas para os briquetes B1 – B2 – B3 estudados.

Tomando por base as conclusões de Lenz e Silva ⁽²⁵⁾ e Malynowskyj et al. ⁽²⁶⁾, verifica-se:

- Baixo teor de ferro total.
- Basicidade binária ($\text{CaO} / \text{SiO}_2$) fora de condição básica.
- Alto teor de enxofre.
- Alto teor de zinco (briquetes B2 - B3).
- Alto teor de álcalis (briquetes B1 - B2 - B3).

Tabela XXI – Geração e consumo de resíduos sólidos para briquetagem.

(*) = Resíduo sólido comercializado.

RESÍDUO	UMIDADE (%)	GERAÇÃO (t/ano)			BRIQUETES (t/ano) – base seca	
		Mensal	Anual	Base Seca	% em Massa	Consumo (t/ano)
LOGFF	22,7	4.900	58.800	45.394	36,5	29.034
LOGFG *	11,0	2.000	24.000	21.360	12,0	9.546
LAFFF	24,0	2.700	32.400	24.624	17,0	13.523
LAFFG	20,0	1.200	14.400	11.520	8,0	6.364
MOÍNHA	-	-	-	-	20,0	15.909
Cimento	-	-	-	-	6,5	5.170
TOTAL		10.800	129.600		100,00	79.546
LOGFF	22,7	4.900	58.800	45.394	23,2	18.455
LOGFG *	11,0	2.000	24.000	21.360	5,4	4.296
POCOL	4,00	5.300	63.600	61.056	37,7	29.989
LAFFF	24,0	2.700	32.400	24.624	12,8	10.181
LAFFG	20,0	1.200	14.400	11.520	5,7	4.534
CLCG	10,6	1.500	18.000	16.092	5,7	4.534
POPES3	6,00	1.700	20.400	19.176	9,5	7.557
TOTAL		19.300	231.600	199.222	100,0	79.546
LOGFF	22,7	4.900	58.800	45.394	36,5	29.034
LOGFG *	11,0	2.000	24.000	21.360	8,50	6.761
LAFFF	24,0	2.700	32.400	24.624	14,2	11.296
LAFFG	20,0	1.200	14.400	11.520	17,0	13.523
CLCG	20,6	1.500	18.000	16.092	8,90	7.080
POPES3	6,00	1.700	20.400	19.176	14,90	11.852
TOTAL		12.000	144.000	116.806	100,0	79.546

Tabela XXII – Análises químicas de resíduos e dos briquetes estudados .

Resid.	RESÍDUO: COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)								BRIQUETE: COMPOSIÇÃO QUÍMICA ESTIMADA (%)							
	Fe _T	C	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Zn	S	Fe _T	C	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Zn	S
LOGFF	69,2	0,80	4,52	1,26	0,05	0,07	0,07	0,01	25,3	0,29	1,65	0,46	0,02	0,03	0,03	0,00
LOGFG	83,0	0,60	3,44	1,17	0,01	0,01	0,01	0,05	9,96	0,07	0,41	0,14	0,00	0,00	0,00	0,01
LAFFF	25,6	22,5	1,57	15,0	0,28	0,45	0,25	0,17	4,35	3,82	0,27	2,55	0,05	0,08	0,04	0,03
LAFFG	33,0	14,8	2,23	12,0	0,12	0,29	0,04	0,17	2,64	1,19	0,18	0,96	0,01	0,02	0,00	0,01
Moinha			85,0					1,00		17,0						0,20
Briquete estudado (B1): composição química estimada (%)									42,3	22,4	2,51	4,11	0,08	0,13	0,07	0,24
LOGFF	69,2	0,80	4,52	1,26	0,05	0,07	0,07	0,01	16,1	0,19	1,05	0,29	0,01	0,02	0,00	0,01
LOGFG	83,0	0,60	3,44	1,17	0,01	0,01	0,01	0,05	4,48	0,03	0,19	0,06	0,00	0,00	4,48	0,03
POCOL	26,0	21,7	4,05	14,5	0,19	0,56	0,05	0,17	9,83	8,20	1,53	5,48	0,07	0,21	9,83	8,20
LAFFF	25,6	22,5	1,57	15,0	0,28	0,45	0,25	0,17	3,27	2,87	0,20	1,92	0,04	0,06	3,27	2,87
LAFFG	33,0	14,8	2,23	12,0	0,12	0,29	0,04	0,17	1,88	0,85	0,13	0,68	0,01	0,02	1,88	0,85
CLCG	73,9	0,60	0,03	0,31	0,01				4,21	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
POPES3	52,9	4,50	10,3	2,72	0,16	1,75		0,09	5,03	0,43	0,98	0,26	0,02	0,17	0,00	0,01
Briquete estudado (B2): composição química estimada (%)									44,8	12,6	4,07	8,72	0,14	0,47	0,06	0,12
LOGFF	69,2	0,80	4,52	1,26	0,05	0,07	0,07	0,01	25,3	0,29	1,65	0,46	0,02	0,03	0,00	0,02
LOGFG	83,0	0,60	3,44	1,17	0,01	0,01	0,07	0,05	8,50	7,06	0,05	0,29	0,10	0,00	0,00	0,01
LAFFF	25,6	22,5	1,57	15,0	0,28	0,45	0,25	0,17	7,06	0,05	0,29	0,10	0,00	0,00	0,01	0,00
LAFFG	33,0	14,8	2,23	12,0	0,12	0,29	0,04	0,17	3,63	3,19	0,22	2,13	0,04	0,06	0,04	0,02
CLCG	73,9	0,60	0,03	0,31	0,01				5,61	2,52	0,38	2,04	0,02	0,05	0,01	0,03
POPES3	52,9	4,50	10,3	2,72	0,16	1,75		0,09	6,58	0,05	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Briquete estudado (B3): composição química estimada (%)									56,0	6,78	4,08	5,16	0,10	0,40	0,05	0,09

Os usos nos conversores da aciaria de briquetes fabricados com resíduos contendo óxido de ferro incluem, segundo Landow⁽²⁷⁾:

- Substituição da sucata.
- Refrigerante na etapa de controle estático.
- Refrigerante na etapa de controle dinâmico.

Uma vez que a maioria das unidades de ferro estão sob a forma de óxidos, o cálculo de carga do conversor é muito afetado pelo aumento da maior capacidade refrigerante do briquete. Então um aumento no nível de gusa líquido é necessário para o balanço térmico da adição do briquete.

A capacidade refrigerante do briquete é calculada entre 2,1 a 2,6 vezes que a da sucata, dependendo da composição química existente, segundo Ballajee et al. apud Landow⁽²⁷⁾.

As experiências de Malynowskyj et al.⁽²⁶⁾, de uso de briquetes em substituição ao sinter usado no controle estático, permitiram concluir que a relação é de 1,38 t de briquete para cada tonelada de sinter, conforme citado anteriormente. Um gráfico comparativo do equivalente térmico do briquete (teórico) é mostrado na Figura 18.

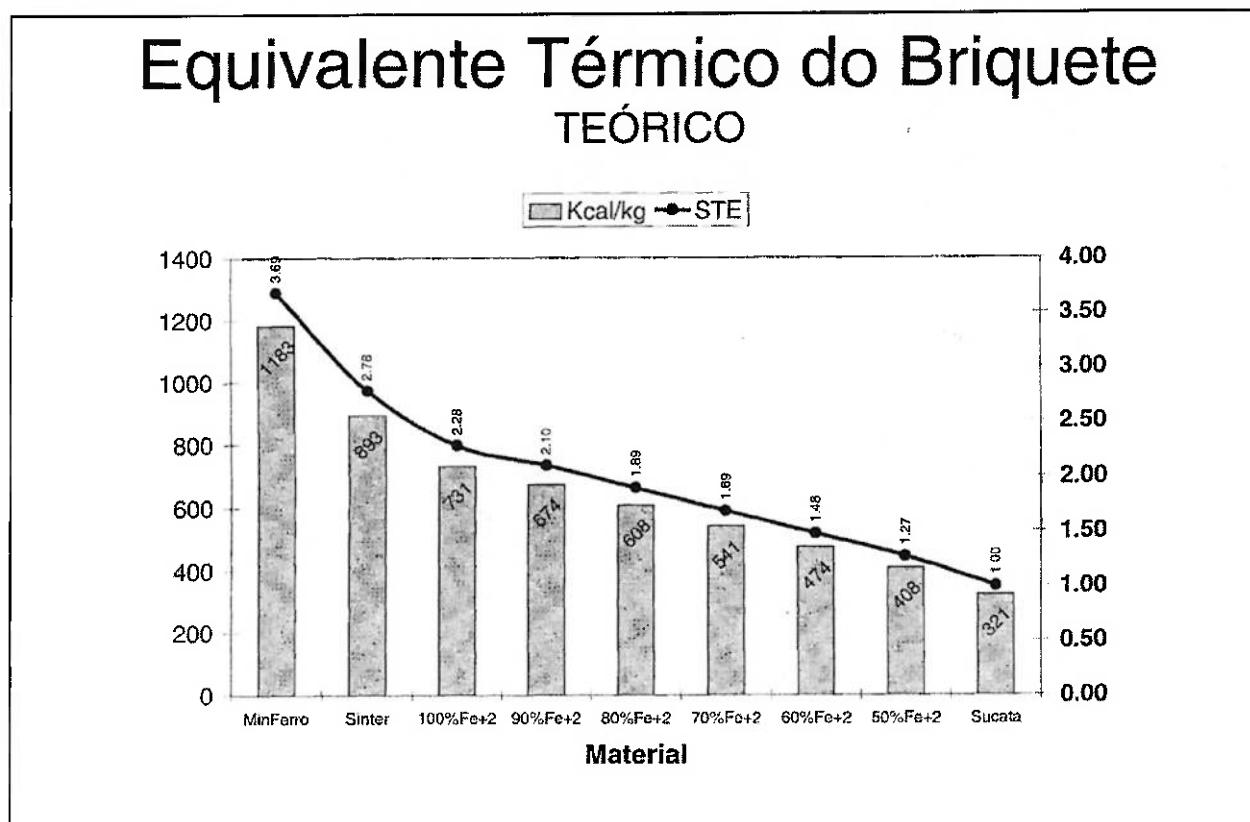


Figura 18 – Equivalente térmico do briquete (teórico)⁽²⁶⁾.

A redução dos óxidos de ferro é a fonte da capacidade refrigerante desses briquetes. O grau de redução é calculado em termos de metalização, conforme explicado por Shaik e colaboradores⁽²⁸⁾.

A fórmula usada para cálculo do grau de metalização é:

$$\text{Grau de metalização} = \frac{\% \text{ Fe}_{(M)}}{\% \text{ Fe}_{(T)}} \times 100$$

Onde: % Fe_(M) = ferro metálico no briquete,

% Fe_(T) = ferro total no briquete,
ambos determinados por análise química.

Isto ficou demonstrado na experiência de Malynowskyj et al.⁽²⁶⁾ conforme indicado na Figura 19.

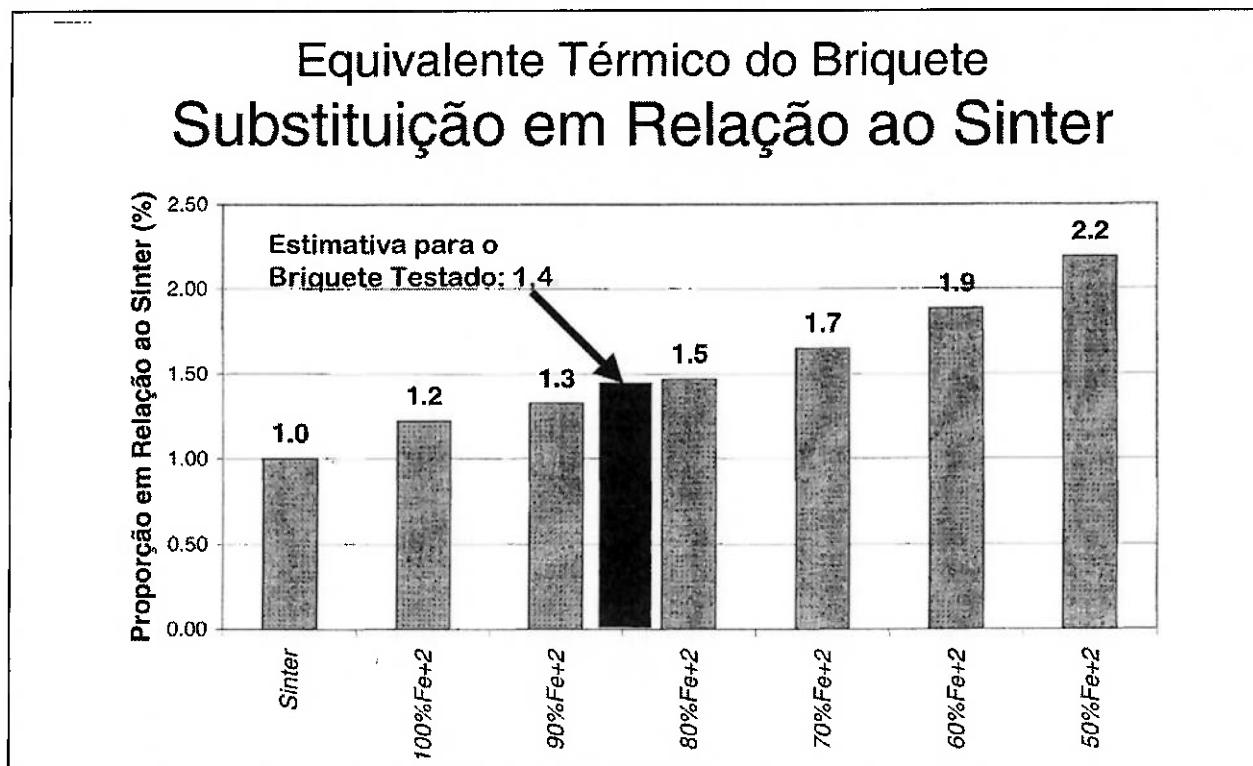


Figura 19 – Equivalente térmico do briquete “cosipa” (teórico)⁽²⁶⁾.

O grau de metalização aumenta com o aumento da temperatura de redução.

O uso do briquete exige aumento de gusa líquido para suprir a energia requerida na redução dos óxidos de ferro. Se existe disponibilidade de gusa líquido, tem-se a energia adicional que deverá ser utilizada para manter a temperatura de vazamento objetivada. Essa energia suplementar pode ser adicionada ao briquete na forma de carbono. Harrison et al. apud Landow⁽²⁷⁾ examinaram o efeito da adição de 20 %C na forma de moínha de coque nos briquetes. Os resultados mostraram que cerca de 85% do combustível foram recuperados (assumindo uma relação CO / CO₂ = 9 / 1). Com relação aos teores de carbono nos briquetes, Lenz e Silva⁽²⁵⁾ considera devam ser limitados para permitir que o combustível seja usado no processo de sinterização.

Outros parâmetros do processo de fabricação do aço podem ser afetados quando se usa briquetes de resíduos siderúrgicos contendo óxidos de ferro: composição química do aço líquido e da escória, rendimento do aço líquido e performance de final de sopro.

A Tabela XXIII mostra o efeito da adição de briquetes de composição química típica para BOF, no rendimento do aço líquido e na composição da escória, conforme Landow⁽²⁷⁾.

Tabela XXIII – Efeitos do briquete no rendimento de aço líquido e na composição química da escória⁽²⁷⁾.

Composição química típica de briquete para BOF (%)													
Fe _T	Fe _{Met}	FeO	Fe ₂ O ₃	C	S	P	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Zn	Pb	
61,6	5,4	46,6	28,9	5,1	0,15	0,09	6,7	1,9	0,57	1,4	0,84	0,04	
Briquetes (kg / corrida)													
Parâmetros			0			6.000				10.000			
Rend. Aço Liq. (%)			92,2			92,6				92,1			
Fe na escória (%)			23,7			22,7				22,5			
FeO na escória (%)			19,6			20,0				-			
MgO na escória (%)			12,9			12,1				12,9			
CaO / SiO ₂			3,7			3,6				3,5			

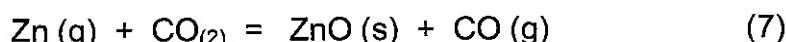
Um dos principais fatores que afetam o rendimento são projeções de metal líquido. Dukelow et al. apud Landow⁽²⁷⁾ verificaram que, quando os briquetes são adicionados substituindo a sucata, projeções aumentam com o aumento do silício no metal líquido.

Nem o rendimento do aço líquido nem o conteúdo de ferro na escória são afetados significativamente pela adição de até 10.000 kg de briquetes / corrida.

Landow⁽²⁷⁾ informou ainda que o rendimento de aço em aciarias usando 8.000 a 20.000 kg de briquetes por corrida, foi superior a 90% de recuperação do ferro.

Com relação aos álcalis nos briquetes B2 e B3, pelo processo a presença destas fases favorecem a fluidização da escória formada, atingindo taxas de desfosforação do aço durante o sopro⁽²⁶⁾. Entretanto, no sistema de limpeza dos gases, a presença de álcalis tem efeito prejudicial: recirculação, incrustações de sais óxidos e variações no pH da água desse sistema.

Sobre a influência dos altos teores de zinco nos briquetes B1 – B2 – B3, esse elemento pode volatizar através das tubulações do sistema de limpeza de gases, podendo depositar-se em regiões mais frias e oxidar-se conforme reação:



Parte do óxido assim formado pode depositar-se nas paredes e nos condutores da saída dos gases⁽²⁶⁾.

6 CONCLUSÃO

A revisão da literatura a respeito de reciclagem de resíduos siderúrgicos contendo óxidos de ferro mostrou que vários trabalhos foram escritos nos últimos anos sobre esse assunto.

Esse fato demonstra a importância da reciclagem, não somente devido a razões econômicas, mas também pela crescente conscientização pela sociedade da preservação do meio ambiente.

O meio ambiente é tratado internamente pelas empresas sob a forma de gestão ambiental, com a finalidade de envolver todos os setores no aumento da produtividade e melhoria da qualidade dos produtos, através da sistematização de práticas ambientais e eliminação de desperdícios.

A gestão de resíduos se aprimora a cada ano, superando a fase do "bota-fora" para uma tendência de desenvolvimento de tecnologias que viabilizem ao máximo o reaproveitamento de resíduos siderúrgicos sólidos, contendo ferro, na própria cadeia de produção do aço.

A reciclagem desses resíduos através da sinterização, prática comum em siderurgia, não é recomendável porque diminui a permeabilidade do leito de carga e causa perda de produtividade.

A reciclagem nos altos fornos é limitada pelo percentual de álcalis e consequente formação de carga inativa no interior destes reatores.

Pelo conjunto de informações experimentais revistas neste estudo, acredita-se em alternativas viáveis à reciclagem e recuperação das lamas de alto forno (LAFFF e LAFFG) e de acaria (LOGFF), considerados resíduos críticos, pois, uma vez não reutilizados, são depositados em aterros industriais a alto custo.

Os testes com briquetes com outros resíduos siderúrgicos sólidos, usados em substituição ao sinter adicionado no cálculo do balanço térmico do sistema de controle estático dos conversores da Aciaria, foram bem sucedidos e indicaram as vantagens de:

- Reaproveitar de resíduos finos contendo ferro.
- Utilizar também resíduos contendo zinco e álcalis.
- Valorizar do ferro contido numa matéria prima de custo negativo para o de aço líquido.

- Evitar a utilização indesejável desses finos na sinterização.
- Evitar o envio de material para aterro industrial.
- Reduzir a compra de pelotas devido à disponibilização de sinter para altos fornos.
- Potencializar um ganho metálico expresso pela produção adicional de placas.
- Minimizar eventuais impactos ambientais.
- Gerar receitas para a COSIPA.
- Obter retorno econômico da ordem de R\$ 30,00 por tonelada de resíduo reciclado.

Existem diversos fatores a serem considerados quando da reciclagem resíduos contendo óxidos de ferro: a composição desses resíduos, a disponibilidade de gusa líquido, o custo de coque, o custo da sucata, os efeitos na composição final do aço, a utilização total desses resíduos na formulação de modo a não acumular passivo ambiental ao longo do tempo e a melhoria das condições ambientais (redução dos níveis de deposição em aterros).

Pelas características apresentadas nas composições de briquetes estudados nesse trabalho, não é recomendável a reciclagem das lamas do alto forno nos conversores da Aciaria:

- Os baixos teores de ferro total não permitiriam elevar o retorno econômico, nem a taxa de formação de escória no inicio do sopro;
- As basicidades binárias atingidas não teriam características de minimização da corrosão do revestimento refratário do conversor;
- Altos teores em enxofre contaminariam o processo de refino do aço.
- Altos teores em zinco podem causar deposição de óxido deste elemento nas paredes e nos condutores de saída de gases.
- Altos teores em álcalis têm efeito deletério no sistema de limpeza de gases
- A não utilização total desses resíduos na formulação, acarretará na formação de um passivo indesejável ao longo dos anos.

Os resultados desse trabalho devem ser usados como subsídios para implementação de alternativa que não só permita a utilização dos resíduos contendo óxido de ferro, mas também encontre um destino mais adequado para o mesmo, contribuindo para a melhoria de qualidade do meio ambiente.

Acredita-se que existe um desafio muito importante para reciclagem de resíduos sólidos através da briquetagem, um processo tecnicamente viável, economicamente atrativo e ambientalmente seguro.

BIBLIOGRAFIA

- **Referências:**

1. OLIVEIRA, L. C. P. Panorama da Gestão de Resíduos: Evolução e Tendências. In: Workshop – Gerenciamento de Resíduos Sólidos no Setor Mínero-Metalúrgico. ABM, Rio de Janeiro, Novembro, 2004.
2. QUITES, E.E.C. Redução de Minério de Ferro em Altos-Fornos. In: Introdução à Siderurgia. São Paulo, ABM, 2007, v.2, p. 55-102.
3. PEREIRA, E. A C. e ALMEIDA, P. S. Desenvolvimento do Processo Regran de Reciclagem de Pós e Lamas em Siderurgia. In: XXXIX Congresso Anual ABM. Belo Horizonte, MG, Julho, 1984.
4. GALDEANO, O. V. R. et al. A experiência da CSN na reciclagem de resíduos sólidos nas sinterizações. Contribuição Técnica nº 2415, XXV Seminário de Redução e Matérias Primas Siderúrgicas, ABM, Volta Redonda, Novembro, 1994.
5. NASCIMENTO, R. C. et al. Caracterização e Viabilização para Reciclagem de Resíduos Siderúrgicos Sólidos. In: 55º Congresso Anual da ABM. Rio de Janeiro, RJ, Julho, 2000.
6. OLIVEIRA, E. R. et MARTINS, J. Emprego de resíduos siderúrgicos e pellet feed minipelotizados na sinterização de minério de ferro. In; REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 56 (4): 2459-254; outubro / dezembro, 2003.
7. NOLDIN Jr., J. H. et all. Flexibilidade de matérias primas no processo Tecnored. In: 61º Congresso Anual da ABM, 4º Seminário de Auto-redução e Aglomeração a Frio. Rio de Janeiro, RJ, Julho, 2006.
8. VIEIRA, A. T. O. et al. Beneficiamento de lama de Alto Forno para obtenção de concentrados de carbono e ferro. In: XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias Primas. Salvador, Setembro, 2007.

9. VIEIRA, A. T. O. et al. Produção de carga metálica a partir de pelotas auto-redutoras em máquina de sinter piloto. In: XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias Primas. Salvador, Setembro, 2007.
10. VIEIRA, A. T. O. et al. Reciclagem industrial de resíduos siderúrgicos através do processamento de pelotas auto-redutoras. In: XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias Primas. Salvador, Setembro, 2007.
11. MOURÃO, MARCELO B. Tendências Tecnológicas na Reciclagem de Resíduos Industriais. Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, 2007.
12. HUNG, T. et al. Recovery of Blast Furnace sludge at CSC. China Steel Technical Report, n.9, p. 131-137, 1995.
13. SODA, I. et al. Zero-Waste Project at Kawasaki Steel, Mizushima Works. In: 32º Steelmaking Seminar (ABM), Salvador, BA, Maio, 2001.
14. JEON, J. et JIN S. Posco's Achievement for the recycling of sludge. SEAISI Quaterly, Dezembro, 2002.
15. ANDRADE, A. F. M. Avaliação do Potencial de Uso do Resíduo Lama Concentrada dos Altos Fornos como Fonte de Zinco na Cultura do Arroz (*Oryza sativa L.*). Dissertação de Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo. Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, UFRRJ, Seropédica, RJ, 2006.
16. ALMEIDA, M. L. B. et MELO, G. C. B. Alternativas de usos e aplicações dos resíduos sólidos das indústrias independentes de produção de ferro-gusa do Estado de Minas Gerais. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, Minas Gerais, 1997.
17. ROSSI, L. A. Gestão Ambiental na CST, Associação Brasileira de Metais, 2003.

- 18.VIEIRA, C. M. F. et al. Incorporação da Lama de Alto Forno em Cerâmica Vermelha. 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Salvador, BA, Junho, 2007.
- 19.FIGUEIRA, R. M. Comportamento Termodinâmico de Alguns Metais Contidos em Resíduos Siderúrgicos quando Reciclados no Alto Forno; Parte 1: Potássio, Sódio, Zinco. Contribuição Técnica ao 56º Congresso Anual da ABM Internacional. Julho, 2001. Belo Horizonte, MG.
- 20.ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004 – Classificação de Resíduos, Rio de Janeiro, 2004.
- 21.ASSIS, R. M. et al. Algumas Questões Ligadas ao Controle Ambiental na Siderurgia e Suas Soluções. Contribuição Técnica ao Seminário de Reciclagem de Resíduos, Setembro, 1997, Vitória, ES.
- 22.TAKANO, C. et al. A Reciclagem de Resíduos Siderúrgicos Sólidos. Seminário sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. São Paulo. Agosto, 2000.
- 23.MORAES, S. L. et CASSOLA, M. S. A Técnica de Aglomeração aplicada ao Reaproveitamento de Resíduos Sólidos. III Workshop Internacional Brasil-Japão. Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Universidade Estadual de Campinas. Novembro, 2005.
- 24.CUNHA, A F. et al. Caracterização, Beneficiamento e Reciclagem de Carepas Geradas em Processos Siderúrgicos. R. Esc. Minas, Ouro Preto, MG, 59 (1): 111-116, Junho/ Novembro, 2006.
- 25.SILVA, G. F. B. L. Reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos contendo ferro via tecnologia de aglomeração através da solução de um modelo multicriterial hierárquico e de programação linear. Dissertação (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

26. MALYNOWSKYJ, A. et al. Uso de Briquetes nos Conversores da Aciaria. XI Seminário de Aciaria. COSIPA, Cubatão, SP, Setembro, 2007.
27. LANDOW, M. Recycling of steel mill by-product materials. Third ASM International Conference on The Recycling of Metals. Barcelona, Espanha, Junho, 1997.
28. SHAIK, A., PAL, S., JHA, R. Briquetting: A new approach to recycle the waste iron-bearing materials generated in steel plants. Journal os Metallurgy and Materials Science, vol. 47, n. 4. Outubro-Dezembro, 2005, pp. 199-205. Printed in India.

ANEXO A

ANEXO A - ESTIMATIVA DE CUSTO x BENEFÍCIO

	Unidade	Custo (R\$/t)	Total	Resultado
PRODUÇÃO DE AÇO	M t / ano	4,5		
Nº DE CORRIDAS / ANO	corridas / ano	28.846		
CONSUMO DE BRIQUETES POR CORRIDA	t / corrida	2.7576		
CONSUMO DE BRIQUETES POR ANO	t / ano	79.546		
PRODUÇÃO DE BRIQUETES COM 2% UMIDADE	t / ano	59.445		
TAXA DE SUBSTITUIÇÃO DO SINTER PÓR PELOTAS NO ALTO FORNO	87,69%			
SINTER DISPONÍVEL PARA SUBSTITUIR PELOTAS		43.076		
REDUÇÃO NA COMPRA DE PELOTAS		162,44	37.773	6.135.914,45
CONSUMO ADICIONAL DE COQUE DEVIDO A SUBSTITUIÇÃO DE PELOTAS POR SINTER	t / ano	641,25	237	151.976,25
 BENEFÍCIO COM A REDUÇÃO DA COMPRA DE PELOTAS	R\$ / ano			5.983.938,20
 TAXA DE INCORPORAÇÃO DO BRIQUETE NO BANHO EM RELAÇÃO AO SINTER	%	57		
RENDIMENTO AÇO LÍQUIDO / CARGA	%	92,3		
RENDIMENTO PLACA / AÇO LÍQUIDO	%	95,45		
GANHO DE PRODUÇÃO DO AÇO LÍQUIDO (*)	t/ano aço liq	8.612		
GANHO DE PRODUÇÃO DE PLACAS		8.220		
PREÇO DE VENDAS PLACAS EXPORTAÇÃO	R\$ / t	752,00		
CUSTO DE MOVIMENTAÇÃO (incluso transporte, estiva e outros)	R\$ / t	24,42		
 BENEFÍCIO COM A VENDA DE PLACAS ADICIONAIS	R\$ / ano			5.980.714,67
 BENEFÍCIO TOTAL	R\$ / ano			11.964.652,87
 CUSTOS:				
COMPRA ADICIONAL DE MINÉRIO DE FERRO	R\$ / t			1.759.778,00
COMPRA ADICIONAL DE MINÉRIO DE ANTRACITO	R\$ / t			287.992,00
COMPRA ADICIONAL DE CALCÁRIO FINO	R\$ / t			205.520,00
REDUÇÃO DE FATURAMENTO COM VENDA DE RESÍDUO LOGFG	R\$ / t	8,01	24.000,00	192.240,00
BRIQUETAGEM	R\$ / t	131,59	59.445	7.822.367,55
 CUSTO TOTAL	R\$ / ano			10.267.897,55
 CUSTO x BENEFÍCIO	R\$ / ano			1.696.755,32
 (*) Obs: Como o sinter que será substituído por briquete possui o mesmo teor metálico do briquete e considerando o uso de uma quantidade maior de briquetes por tonelada de aço, possivelmente haverá um ganho metálico.				