

ANÁLISE DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE ESCÓRIAS DE DESSULFURAÇÃO VISANDO INCREMENTO DE RECICLAGEM NA SINTERIZAÇÃO*

Ricardo Filipe Teixeira Moreira¹

Marcos Aurélio Larcher²

Naiyang Ma³

Vinicius dos Reis Carvalho⁴

Resumo

O trabalho mostra um estudo de caso da ArcelorMittal Tubarão onde, com o objetivo de incrementar a reciclagem de escórias de dessulfuração, foram analisadas as influências do processo de beneficiamento por separação magnética de forma a obter um coproduto com menor presença de S e maior concentração de Fe e assim permitir sua maior reutilização na Sinterização. O projeto se desenvolveu em etapas de amostragem, caracterização, testes experimentais de laboratório, processamento em escala industrial e, por fim, com a adição do coproduto na Sinterização e compilação de resultados. O trabalho conclui a viabilidade de alteração das configurações de processamento com resultados positivos permitindo incremento de consumo de escórias de dessulfuração na Sinterização com ganhos financeiros e ambientais.

Palavras-chave: Escórias; Reciclagem; Resíduos; Coprodutos;

DESULPHURIZATION SLAG PROCESSING ANALYSIS TO INCREASE RECYCLING IN SINTERING UNIT

Abstract

This case study shows the ArcelorMittal Tubarão experience where, with the target to increase the desulphurization slag recycling, the influence of the weak magnetic processing was analyzed in order to achieve a byproduct with lower S and higher Fe and so allow increase its consumption in Sintering unit. This study was developed in stages of sampling, characterization, processing pilot test and finally, the addition in the Sintering process and results data analysis. This study concludes the viability of getting positive results with process setting changes, allowing increase desulphurization slag consumption in Sintering unit with environmental and financial gains.

Keywords: Slags; Recycling; Wastes; Byproducts;

- ¹ Engenheiro Industrial Mecânico, Especialista de Desenvolvimento de Coprodutos, Área de Coprodutos, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo – Brasil.
- ² Técnico Metalurgista, Administrador de Empresas, Especialista de Matérias-Primas e Sinterização, Divisão de Controle Técnico de Produção de Gusa e Energia, Sinterização, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo – Brasil.
- ³ Ph.D. / Lead Engineer, Recycling, Raw Materials and Ironmaking, Global Research and Development, ArcelorMittal East Chicago – EUA.
- ⁴ Engenheiro Metalúrgico e de Materiais, Pós Graduado em Materiais, Especialista de Produção de Aço, Unidade Técnica da Aciaria, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo – Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A Siderúrgica ArcelorMittal Tubarão utiliza o processo de dessulfuração em panela denominado KR (Kambara Reactor) [1] para tratamento do gusa antes de sua adição nos convertedores. Junto com o gusa tratado (baixo enxofre) o processo KR gera também uma escória de dessulfuração em torno de 34 kg/t Aço Líquido. No processo base de beneficiamento de coprodutos de KR da ArcelorMittal Tubarão, após o processamento da escória KR por etapas de britagem, separação magnética e peneiramento, eram obtidas cerca de 19 kg/t Aço Líquido de finos metálicos de KR e cerca de 5 kg/t Aço Líquido de escórias finas de KR. Também são produtos deste processamento, sucatas e escórias > 12 mm. Com uma projeção de produção de 7 milhões de t Aço Líquido/ano na unidade de Tubarão, temos números consideráveis de gerações destas escórias no processo.

Os finos metálicos são a fração imantada no processo de separação magnética com granulometria menor que 12 mm e as escórias finas são a fração não imantada com granulometria menor que 12 mm, ambas obtidas no processamento das escórias de dessulfuração KR. Tanto os finos metálicos como as escórias finas apresentavam % de S alto em sua composição o que limitava sua maior reciclagem na Sinterização. A alta variabilidade dos percentuais de S na composição química dos finos metálicos de KR não era atrativa para a confiabilidade de incremento de reciclagem na Sinterização e a presença de Fe residual nas escórias finas não era atrativa para a aplicação em cimenteiras. Conseqüentemente, ocorria a condição de geração maior que o consumo e a estocagem destes coprodutos em pátios internos. Em 2013 este estoque atingiu um volume de 150.000t.

Como plano de ação foi formado um grupo de trabalho envolvendo técnicos das áreas de coprodutos, unidades técnicas de Aciaria e Sinterização e unidade de pesquisa da ArcelorMittal Tubarão de Chicago, visando analisar parâmetros de processo de beneficiamento de forma a obter uma otimização da rota de processamento para melhorar a qualidade dos finos metálicos com a concentração de Fe e redução presença de S.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Amostragem

Para uma análise representativa do processo foi estipulado um plano de amostragem tendo como referência a norma ABNT 10.007 [2]. Para a coleta de amostra na pilha de escória de dessulfuração bruta (sem processamento) foram feitas 30 inserções de retirada de material com a utilização de pá carregadeira ao longo de toda a pilha, coletando amostras no topo, meio e base em cada uma das 10 seções conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2. Após o beneficiamento da escória bruta foram coletados 30 incrementos de amostra com a utilização de extrator manual ao longo de cada pilha de material processado (finos metálicos de KR < 12 mm e escórias finas de KR < 12 mm).

Ao final desta etapa, foi obtida 1 amostra composta de cerca de 150 kg de cada tipo de coproduto: 150 kg de amostra de finos metálicos de KR e 150 kg de amostra de escórias finas de KR. Estas amostras foram enviadas para o laboratório da ArcelorMittal em Chicago – EUA para a início das avaliações.

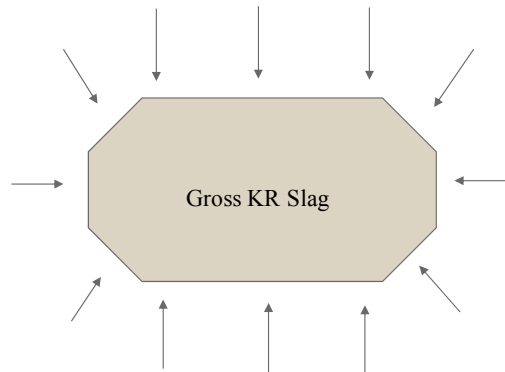


Figura 1. Esquema de divisão de seções de amostra da pilha de escória bruta.



Figura 2. Coleta da Amostra de Pilha de Escória bruta com pá carregadeira.

2.2 Caracterizações

Sub amostras representativas foram coletadas das amostras enviadas. As sub-amostras foram secas em estufas a uma temperatura de 105°C. As sub-amostras foram mantidas na estufa até que não fossem registradas alterações de perda de massa, efetuando-se assim a medição da umidade dos coprodutos.

De cada amostra seca foi retirada uma sub-amostra. A sub-amostra seca foi pulverizada para uma fração menor que 80 mesh em um pulverizador de anel BICO. Como tanto as amostras de finos metálicos como as de escórias finas apresentaram em alguns momentos, nódulos metálicos difíceis de serem moídos, algumas amostras não foram 100% moídas abaixo de 80 mesh. Para esta condição, a fração menor que 80 mesh foi submetida a análise química por difração raio x e a fração maior que 80 mesh, por inferência baseada na experiência da Área de Pesquisa & Desenvolvimento da ArcelorMittal Chicago, foi considerada com 95% de Fe para que posteriormente fosse utilizada na correção dos resultados de análise química da fração moída e assim compor uma análise final da amostra.

Outra avaliação também foi feita submetendo as amostras secas a um peneiramento na malha de 6,3 mm visando identificar se a fração acima de 6,3 mm poderia ser usada diretamente em outro processo como Briquetagem e/ou Alto Forno.

2.3 Testes Laboratoriais com Separadores Magnéticos Manuais

Vários Separadores magnéticos manuais com diferentes intensidades de campo magnético foram utilizados inicialmente nas amostras para explorar a possibilidade de separação de partículas com maior concentração de Fe das demais partículas

nos finos metálicos e nas escórias finas de KR. Alguns dos separadores magnéticos utilizados estão ilustrados na Figura 3.



Figura 3. Exemplos de Separadores Magnéticos Manuais usados no teste de Laboratório.

Os produtos obtidos desta separação foram identificados como magnéticos e não magnéticos e foram submetidos a análises químicas para identificar as influências deste processo de beneficiamento.

2.4 Testes Piloto com Tambor Magnético Experimental

Experimentos também foram conduzidos em laboratório utilizando um tambor magnético piloto com 381 mm de diâmetro e 305 mm de largura. O campo magnético na superfície de contato do tambor é de 1.000 Gauss. A velocidade do tambor permite ajustes na faixa de 15 e 87 rpm. A intensidade do campo magnético na superfície de contato com o material foi regulada com a colocação de revestimentos (espaçadores) no tambor. O equipamento piloto é demonstrado na Figura 4, e consiste de uma tremonha (1), alimentador vibratório (2), tambor magnético de ímã permanente (3), damper de corte (4), regulador de velocidade do tambor (5) e motor (6).

A regulagem do alimentador vibratório foi adaptada para simular uma condição de campo de 50t/h em função da largura da correia e o damper de corte foi mantido no mesmo posicionamento em referência ao eixo do tambor da planta industrial. Com estas considerações, visando reconhecer as influências do processo de beneficiamento no rendimento e qualidade dos coprodutos, assumiu-se como variáveis do estudo a velocidade do tambor e a intensidade do campo magnético.



Figura 4. Equipamento piloto de separação magnética

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição Química das Amostras Base

A composição química das amostras iniciais de finos metálicos e escórias finas de KR são apresentadas na Tabela 1. A análise de umidade se refere as amostras antes da secagem e os demais dados foram obtidos em base seca. Como todas estas amostras foram passíveis de moagem em fração menor que 80 mesh, neste caso não foi necessário fazer a correção da composição.

Tabela 1 Composição Química dos Finos Metálicos e Escórias Finas de KR (%)

Amostra	Finos Metálicos	Escórias Finas
Umidade	17,74	18,05
Fe	39,80	37,89
SiO ₂	6,98	8,13
Al ₂ O ₃	3,07	3,70
TiO ₂	0,19	0,24
CaO	30,25	36,48
MgO	1,39	1,65
MnO	0,99	1,08
Na ₂ O	<0,1	<0,1
K ₂ O	0,02	0,03
P	0,09	0,10
Cr ₂ O ₃	0,06	0,01
C	2,53	1,91
S	1,236	1,444
Pb	<0,01	<0,01
Zn	<0,01	<0,01

As informações da Tabela 1 mostram que:

1. O Fe contido nas escórias finas (37,89%) não é significativamente diferente do Fe contido nos finos metálicos (39,80%). Desta forma, em termos de separação/concentração metálica das frações finas de escórias de dessulfuração, o processo não mostrava boa eficiência.
2. Tanto os finos metálicos quanto as escórias finas contêm S alto (maior que 1,2%) o que dificulta incremento de consumo na Sinter.

3.2 Correlação Granulometria x Análise Química

Os resultados de composição química das amostras de finos metálicos e escórias finas de KR que foram separadas por peneiramento na malha de 6,3 mm são apresentados na Tabela 2. A composição química de cada fração é apresentada na análise das amostras em base seca.

Da Tabela 2, podemos observar que a fração mais grossa (+ 6,3mm) contém maior Fe e menos S do que a fração fina (- 6,3mm), valores de 56% e 49% de Fe são encontrados nas frações grossas dos finos metálicos e escórias finas de KR respectivamente. Embora o rendimento de extrações destas frações com o peneiramento seja menor que 5%, esta informação indica um ponto de referência de corte de peneiramento potencial nas configurações de processamento.

Tabela 2 Composição Química dos Finos Metálicos e Escórias Finas de KR (%) x Granulometria

Amostra	Finos Metálicos		Escórias Finas	
	+ 6,3 mm	-6,3mm	+ 6,3 mm	- 6,3 mm
Granulometria	+ 6,3 mm	-6,3mm	+ 6,3 mm	- 6,3 mm
Rendimento	4,63	95,37	3,06	96,94
Fe	56,01	37,52	49,11	31,39
SiO ₂	5,14	7,32	8,42	7,92
Al ₂ O ₃	1,48	2,92	2,07	3,42
TiO ₂	0,15	0,21	0,22	0,24
CaO	20,11	31,9	21,12	35,74
MgO	1,45	1,34	2,72	1,52
MnO	1,02	0,92	1,61	0,95
Na ₂ O	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
K ₂ O	0,01	0,03	0,02	0,03
P	0,14	0,11	0,17	0,11
Cr ₂ O ₃	0,09	0,09	0,09	0,06
C	2,57	2,33	1,98	1,88
S	0,716	1,294	0,768	1,524

3.3 Efeitos do Campo Magnético dos Separadores Manuais no Beneficiamento dos Coprodutos

Os resultados de composição química obtidos com o beneficiamento experimental por separadores magnéticos manuais são apresentados nas Tabelas 3 e 4. Os efeitos da intensidade dos campos magnéticos no rendimento de beneficiamento (Yield), na concentração de Fe e na segregação do S são mostrados nas Figuras 5 e 6.

Tabela 3 Resultados da separação magnética manual nos finos metálicos de KR

Intensidade (Gauss)	225		425		800	
	Magnético	Não Mag.	Magnético	Não Mag.	Magnético	Não Mag.
Classificação	Magnético	Não Mag.	Magnético	Não Mag.	Magnético	Não Mag.
Rendimento %	22,36	77,64	69,33	30,67	93,67	6,33
Fe %	55,10	29,05	45,77	13,29	37,10	9,91
S %	0,667	1,383	1,065	1,572	1,173	1,308

Tabela 4 Resultados da separação magnética manual nas escórias finas de KR

Intensidade (Gauss)	225		425		800	
	Magnético	Não Mag.	Magnético	Não Mag.	Magnético	Não Mag.
Classificação	Magnético	Não Mag.	Magnético	Não Mag.	Magnético	Não Mag.
Rendimento %	17,61	82,39	54,56	45,44	92,42	7,56
Fe %	65,06	22,48	44,01	12,44	32,66	9,04
S %	0,683	1,449	1,106	1,618	1,306	1,233

Fica claro que a intensidade do campo magnético tem efeitos significativos no rendimento e na qualidade de processamento relacionada a concentração de Fe e segregação de S. Relacionando todos estes parâmetros de processo passamos a focar a região abaixo de 500 Gauss ponderando um ponto de equilíbrio entre ganhos de qualidade e rendimento de processamento.

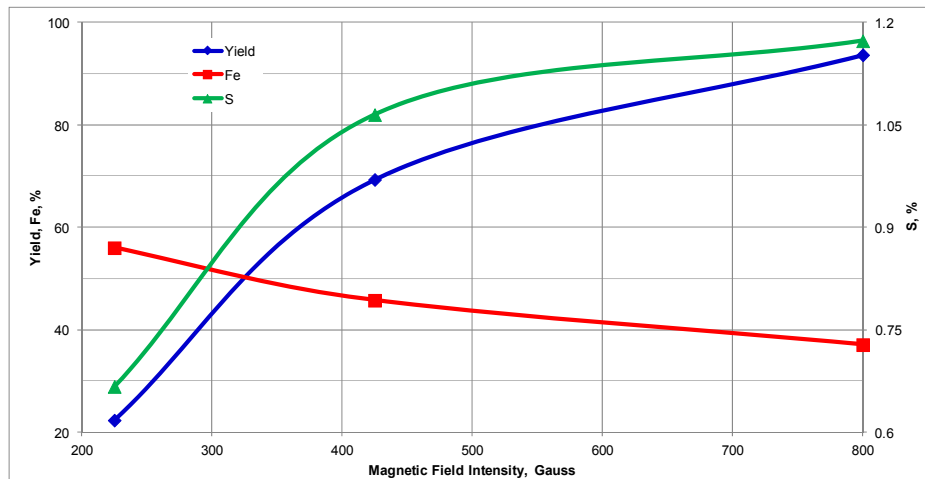


Figura 5. Efeito do Campo Magnético na separação de finos metálicos de KR

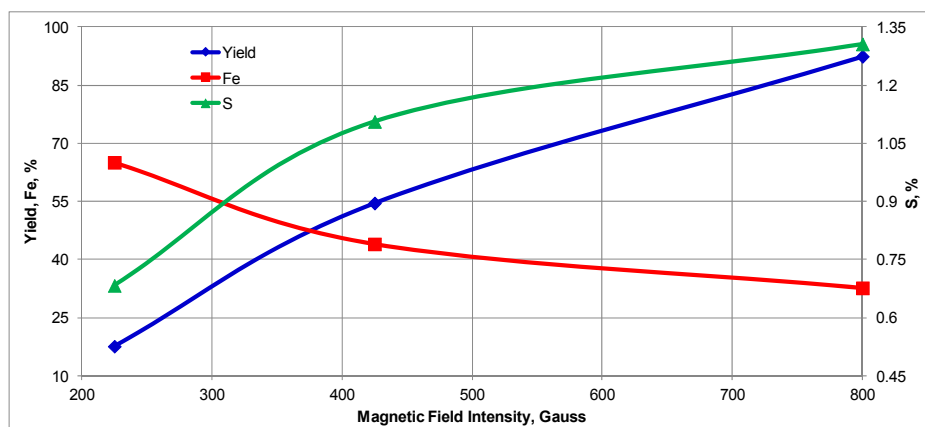


Figura 6. Efeito do Campo Magnético na separação de escórias finas de KR

3.4 Efeitos da Intensidade do Campo Magnético e da Velocidade de Correia do Tambor Magnético Experimental no Beneficiamento de Coprodutos

O processo de beneficiamento industrial que originou as amostras iniciais apresentava campo magnético de 880 Gauss na superfície da correia e velocidade de correia de 52 m/min (33 rpm em tambor de diâmetro 500 mm).

Os resultados obtidos nos testes com tambor magnético experimental em diferentes campos magnéticos e velocidades de correia são apresentados nas Tabelas 5 e 6. Os efeitos da variação da velocidade de correia em um campo magnético de 500 Gauss foram plotados nas Figuras 7 e 8 mostrando o resultado de segregação.

Fica claro que com velocidades de correia maiores, o processo de beneficiamento é capaz de gerar coprodutos mais concentrados em Fe e com menor S nas frações metálicas, porém com baixo rendimento de processamento.

Tabela 5 Resultados da separação magnética do tambor experimental nos finos metálicos de KR

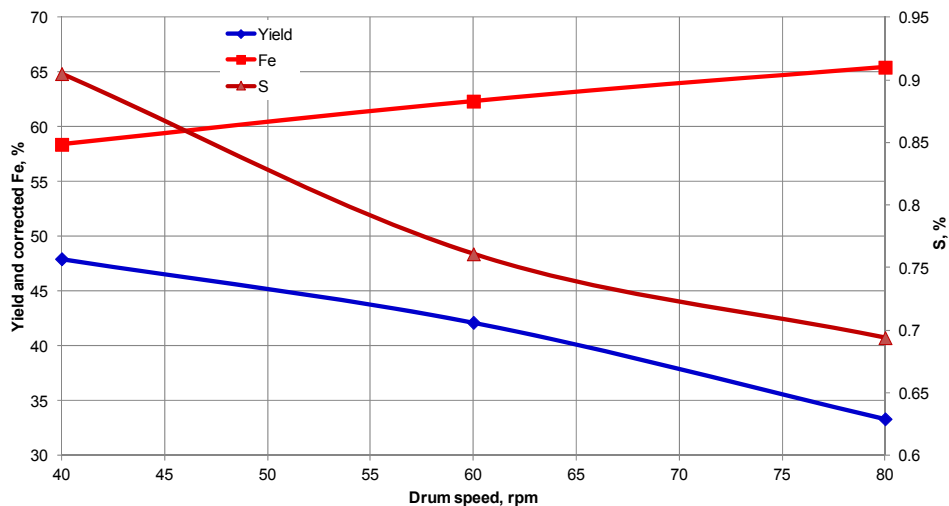
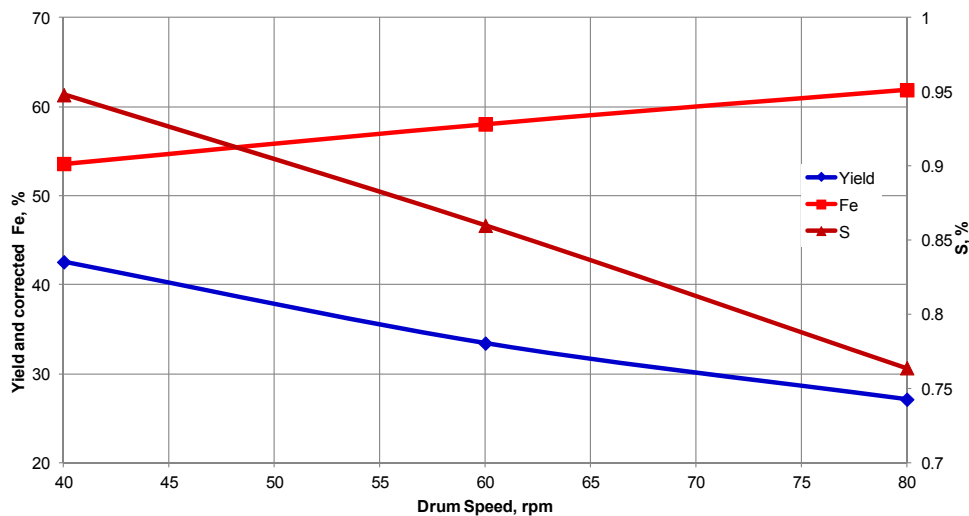
Intensidade (Gauss)	200		400				500			
	RPM Tambor		31		40		40		60	
Classificação	Mag.	Não Mag.	Mag.	Não Mag.	Mag.	Não Mag.	Mag.	Não Mag.	Mag.	Não Mag.
Rendimento %	6,12	93,88	39,92	60,08	38,08	69,33	47,95	52,05	42,14	57,86
Fe %	55,87	37,27	59,02	21,93	59,59	45,77	51,02	18,39	56,78	19,05
S %	0,817	1,118	1,082	1,617	0,848	1,677	0,905	1,427	0,761	1,387

Obs.: Mag. = Fração Magnética e Não Mag. = Fração não Magnética

Tabela 6 Resultados da separação magnética do tambor experimental nas escórias finas de KR

Intensidade (Gauss)	200		400				500			
	80		31		40		40		60	
RPM Tambor	80		31		40		40		60	
Classificação	Mag.	Não Mag.	Mag.	Não Mag.	Mag.	Não Mag.	Mag.	Não Mag.	Mag.	Não Mag.
Rendimento %	4,58	95,42	34,21	65,79	30,57	69,43	42,56	57,44	33,43	66,57
Fe %	52,02	30,79	54,19	17,98	58,13	18,00	49,24	15,07	53,82	17,83
S %	0,852	1,215	0,999	1,695	0,855	1,723	0,948	1,475	0,860	1,396

Obs.: Mag. = Fração Magnética e Não Mag. = Fração não Magnética

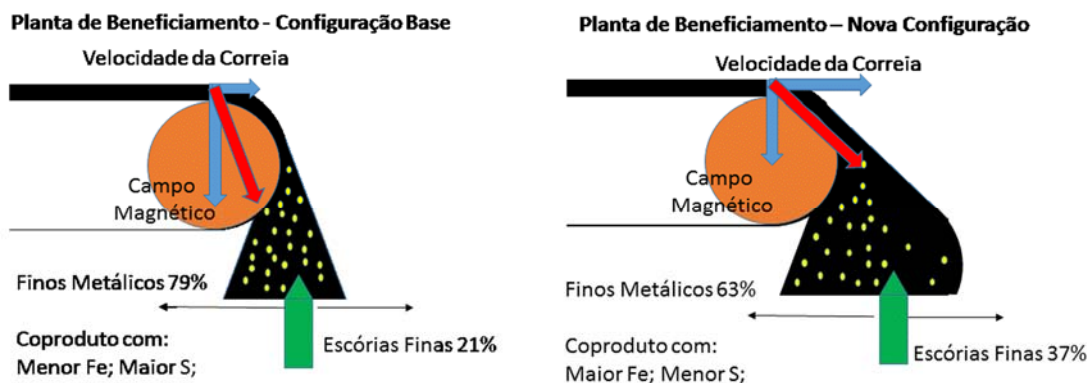
**Figura 7.** Efeito da rotação do tambor na separação de finos metálicos de KR a 500 Gauss**Figura 8.** Efeito da rotação do tambor na separação de escórias finas de KR a 500 Gauss

3.5 Ajustes das Configurações da Planta de Beneficiamento

Com todas as informações obtidas nas observações do processo experimental de laboratório apresentadas até o momento, foi configurada a alteração dos parâmetros de processo de beneficiamento de campo, alterando-se o campo magnético dos tambores e a velocidade de correia visando obter maior concentração de Fe e menor presença de S, conforme mostrado na Tabela 7 e Figura 9.

Tabela 7 Alterações das configurações da planta de processamento industrial

Configurações	Configuração Base	Nova Configuração
RPM Tambor	33	45
Diâmetro Tambor (mm)	500	500
Velocidade (m/s)	52	71
Campo Magnético Tambor (Gauss)	880	450

**Figura 9.** Efeito da velocidade da correia e campo magnético na planta de beneficiamento

3.6 Ganhos no Campo de Aplicação de Coprodutos do KR

A alteração da configuração da planta de beneficiamento permitiu, com a alteração da composição química dos coprodutos gerados, ampliar o campo de aplicação dos coprodutos do KR principalmente para a Sinterização e Briquetagem e, com isso reduzir significativamente a parcela destinada a estoques internos, auferindo assim também, ganho ambiental ao projeto conforme Tabela 8.

Tabela 8 Quadro de destinação de coprodutos do KR

Coproductos KR	Configuração Base			Nova Configuração		
	Geração	Destinação	Estoque	Geração	Destinação	Estoque
Sucatas > 12 mm	15%	AF / Comerc.	0%	15%	AF / Comerc.	0%
Escórias > 12 mm	15%	Rodoviário	7%	15%	Rodoviário	7%
Finos Metálicos	55%	Sinter	42%	44%	Sinter/Briq.	0%
Escórias Finas	15%	Rodov./Cim.	0%	26%	Rodov./Cim.	0%

Obs. Os percentuais apresentados são em referência a geração total de coprodutos do KR

3.7 Reciclagem de Escória KR na Sinterização

O maior impacto de alteração na recuperação de coprodutos do KR, foi o incremento do % de reciclagem na Sinterização que passou de 13% para 34% da geração total deste coproduto. Este aumento ocorreu basicamente pela redução de S e maior estabilidade da composição química do coproduto finos metálicos do KR a partir da alteração de configuração da planta de beneficiamento em abril/2014. A Tabela 9 mostra a alteração da composição química média dos finos metálicos do KR com a alteração da configuração da planta de beneficiamento.

Tabela 9 Alteração da composição química dos finos metálicos de KR

Composição (%)	FeT	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	ZnO	K ₂ O	Na ₂ O
Configuração Base	29,9	11,7	4,34	37,3	4,46	1,31	0,012	0,043	0,063
Nova Configuração	54,8	7,0	2,34	21,0	2,3	0,57	0,04	0,027	0,043

Na Tabela 10 e na Figura 10 são mostradas as evoluções de consumo de finos metálicos de KR e seus respectivos ganhos na Sinterização. O ganho calculado na Sinterização, leva em consideração somente o volume incremental com a nova configuração de processamento sob o seguinte conceito:

1 t de incremento de consumo de finos metálicos de KR = 0,74 t sinter feed.

Tabela 10 Evolução de consumo e ganhos com reciclagem de finos metálicos de KR na Sinterização

Ano	2013	2014	2015
Modelo Planta Beneficiamento	Config. Base	Nova Config.	Nova Config.
Média Consumo Mensal (t/mês)	2.136	3.433	5.977 *
Ganho Incremental (US\$x1000)	Referencia	482	381 *

(*) Dados apurados referentes ao período de jan a mar/15

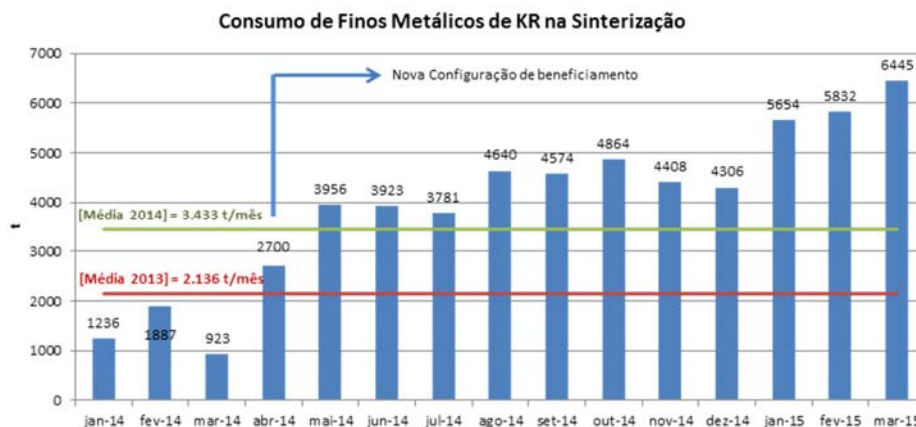


Figura 10. Evolução do consumo de finos Metálicos de KR Início de Nova Configuração de Processamento em abril/14.

4 CONCLUSÃO

- A. Fica evidenciado que a intensidade do campo magnético e a velocidade das correias tem efeitos significativos no rendimento e na qualidade de processamento relacionada a concentração de Fe e segregação de S.
- B. A partir da análise dos resultados dos experimentos, foi possível propor novas configurações para a planta de beneficiamento, de forma a termos um coproduto com concentrações de Fe maiores, menor presença de S e menor variabilidade de comportamento tornando mais atrativo sua reciclagem em plantas de Sinterização.
- C. A nova configuração operacional permitiu criar novas rotas de reciclagem como finos metálicos para a Briquetagem e escórias finas para comercialização gerando redução de estoques internos gerando ganho ambiental para o projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 Kirmse OJ. Estudo do comportamento metalúrgico do “Reator Kambara” através de modelagem física. Ouro Preto – MG. Dissertação [Mestrado em Engenharia de Materiais e Metalurgia] - Rede Temática em Engenharia de Materiais- REDEMAT, do convênio entre a Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP, o Centro Tecnológico de Minas Gerais- CETEC e a Universidade do Estado de Minas Gerais- UEMG;
- 2 Associação Brasileira De Normas Técnicas. ABNT NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 21 p.