



PRODUÇÃO DE SÍNTER A PARTIR DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS*

Vitor de Oliveira Campos¹
Fabiana Fonseca de Moraes²
Ulisses Gustavo de Oliveira³
Djalma Nere Júnior⁴

Resumo

Vários resíduos gerados nos processo siderúrgico são fonte de ferro e podem ser reciclados e reintegrados de volta ao ciclo produtivo do ferro. Exemplos incluem pós de coletores e despoeiramento, carepas e lamas. Estes materiais são geralmente classificados como rejeitos e são descartados em aterros a um alto custo, mas adquirem um valor significativo quando reciclados e reutilizados apropriadamente. O presente estudo consiste em demonstrar a viabilidade da utilização destes resíduos em um processo de mini sinterização, plantas de sinterização produzindo até 1 milhão de toneladas por ano. O produto obtido apresenta propriedades químicas e físicas adequadas para carregamento direto no alto-forno, para utilização como nucleante na sinterização, ou como refrigerante no convertedor. O balanço do zinco e dos álcalis é de extrema importância para viabilizar um sinter final com qualidade requerida e será analisado neste estudo. Conclui-se que a utilização dos resíduos citados é economicamente viável e o estudo de caso apresentado neste trabalho comprova o benefício com retorno significativo.

Palavras-chave: Sinterização; Resíduos siderúrgicos; Lama de aciaria

SINTER PRODUCTION FROM IRON AND STEEL MAKING RESIDUES

Abstract

Several of the residues generated in the steel and iron making processes are source of iron and may be recycled and re-incorporated in the productive cycle of the iron. Examples are the dust of dustcatchers and bag filters, mill scale and sludges. These materials are often classified as waste and are dumped in landfills at high cost, but could generate value when recycled and reused properly. The present study aims to demonstrate the feasibility of using these waste materials in a mini sintering process, sinter plants producing up to 1 million tons per year. The obtained product has suitable chemical and physical properties for direct charging in the blast-furnace, for use as nucleant in a large sinter plant or as coolant agent in the converter. The zinc and alcalis balance is important to guarantee a sinter with the required quality and will be analysed. As conclusion, the use of the residues is economically feasible and the case study presented proves the benefit with significant return.

Keywords: Sinter; Sintering; Steel shop sludge;

¹ Engenheiro de processos, Paul Wurth do Brasil, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheira de projetos, Paul Wurth do Brasil, Belo Horizonte, MG, Brasil

³ Engenheiro metalurgista, Ecosteel, Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro mecânico, Ecosteel, Belo Horizonte, MG, Brasil

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

Em 2013 foram produzidas no mundo inteiro cerca de 1,6 bilhões de toneladas de aço [1]. A produção do aço e do ferro acompanham inevitavelmente a produção dos mais diversos coprodutos, alguns mais nobres, outros menos.

A esses coprodutos podem ser dados basicamente dois destinos: deposição ou reutilização. Até pouco tempo, a deposição era o destino indiscutível da maior parte dos resíduos siderúrgicos sólidos. A restrição da legislação e o aumento da pressão da proteção ambiental mudaram esse cenário e a deposição de resíduos em aterros está se tornando uma solução custosa e indesejada.

A possibilidade de reutilização desses rejeitos, por sua vez, está diretamente relacionada a dois fatores:

- 1) o teor de elementos reaproveitáveis e com a disponibilidade de tecnologias para extração desses elementos dos resíduos. Alguns elementos podem ser diretamente reintegrados ao ciclo produtivo do aço, especialmente o ferro e o carbono. Outros elementos importantes, tais como os álcalis e o zinco são indesejáveis na rota de produção do aço, e por isso precisam ser removidos ou tratados de alguma forma dentro do processo produtivo.
- 2) A disponibilidade de tecnologias de reciclagem consolidadas que permitem a adequação das propriedades físico-químicas dos resíduos para reincorporação na rota de produção do aço ou para a destinação a outros processos produtivos.

Os mais diversos processos foram desenvolvidos para adequação e/ou reaproveitamento de resíduos siderúrgicos. Os processos se diferenciam pelo tipo de resíduo a ser tratados, pelo princípio de tratamento e pelo produto obtido do tratamento. Na maioria dos processos disponíveis, algumas limitações impedem a utilização de tipos de resíduos diferentes ou com composições inaceitáveis para esse processo, tais como:

- Conteúdo de óleo nos resíduos a serem tratados
- Teor de zinco e de álcalis
- Umidade excessiva
- Dificuldade de manuseio

O produto desses tratamentos possui também, muitas vezes, propriedades limitantes à reintrodução direta ao processo.

Dentre diversas tecnologias de tratamento de resíduos, a sinterização é um dos mais conhecidos e aplicados mundialmente, chegando a representar mais de 40% do tratamento de resíduos produzidos [2]. Entretanto, o próprio processo de sinterização esbarra em obstáculos quando é usado para esse fim. O manuseio dos resíduos tais como lamas muito úmidas, assim como de carepas é problemático; pós muito finos podem causar perda de permeabilidade quando não corretamente aglomerados, e por fim a dosagem de coprodutos acima de teores aceitáveis acarreta perda de produtividade na máquina de sinterização.

A importância da sinterização na reciclagem de coprodutos sólidos também se defronta com o aumento de importância da sinterização no atual contexto do afinamento e da redução da qualidade geral dos minérios. Deseja-se usar a sinterização para reaproveitar os coprodutos, mas sem comprometer a produtividade e a funcionalidade das sinterizações.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



Nesse cenário de pressão ambiental e importância da sinterização, a Paul Wurth e a Ecosteel desenvolveram um modelo de reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos usando sinterizações de pequeno porte (mini sinterização). O modelo prevê o consumo da maior parte dos resíduos gerados por uma siderúrgica, sendo que uma parte do sinter produzido possui qualidade apropriada para carregamento no forno, outra parte pode ser usada como nucleante na sinterização grande ou como refrigerante para o convertedor LD. O modelo prevê ainda o correto manuseio de resíduos problemáticos como lamas e contempla um balanço de álcalis e zinco para reduzir o impacto dessas substâncias no alto-forno. Com a implantação desse modelo produtivo, a sinterização grande pode retornar à produtividade que teria sem utilização dos resíduos em sua carga.

A reciclagem dos resíduos traz vantagens como menor utilização de minério granulado ou pelotas, aumento de produtividade na sinterização grande (devido a não utilização de resíduos e a utilização do sinter da mini sinterização como nucleante) e devido à redução dos custos com deposição das matérias-primas, entre outras vantagens.

O objetivo deste trabalho é avaliar tecnicamente e economicamente a viabilidade do modelo de processamento de resíduos siderúrgicos para produção de sinter. Os custos de processamento serão confrontados com a receita advinda das vantagens de produção e utilização do sinter, e o resultado é o balanço econômico do modelo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para análise do modelo, utilizaram-se algumas premissas compatíveis com a operação de uma siderúrgica de médio e grande porte, referentes à geração e propriedades dos resíduos sólidos. O modelo está considerando primordialmente a utilização dos seguintes resíduos:

- Carepas de laminação
- Carepas de aciaria
- Lama fina de aciaria
- Lama grossa de aciaria
- Lama fina e grossa de alto-forno
- Finos diversos de peneiramento
- Pós de limpeza industrial

Para este trabalho, realizou-se uma análise geral das propriedades (composição química, granulometria, umidade) e disponibilidade dos resíduos gerados em algumas siderúrgicas brasileiras. Com base nesta análise, selecionaram-se valores típicos de composição química e disponibilidade a fim de se realizar uma avaliação técnica e econômica típica do modelo.

Na avaliação técnica, realizaram-se os balanços de massa e energia apropriados para estimar a produção de sinter, a qualidade físico-química do sinter e a quantidade de matérias-primas e consumíveis adicionais (aglomerantes e combustíveis sólidos, energia elétrica, água) necessários para a produção do sinter de resíduos. Considerou-se também o balanço de elementos mais importantes (álcalis e zinco).

O diagrama abaixo resume o modelo de recuperação de resíduos adotado:

* *Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

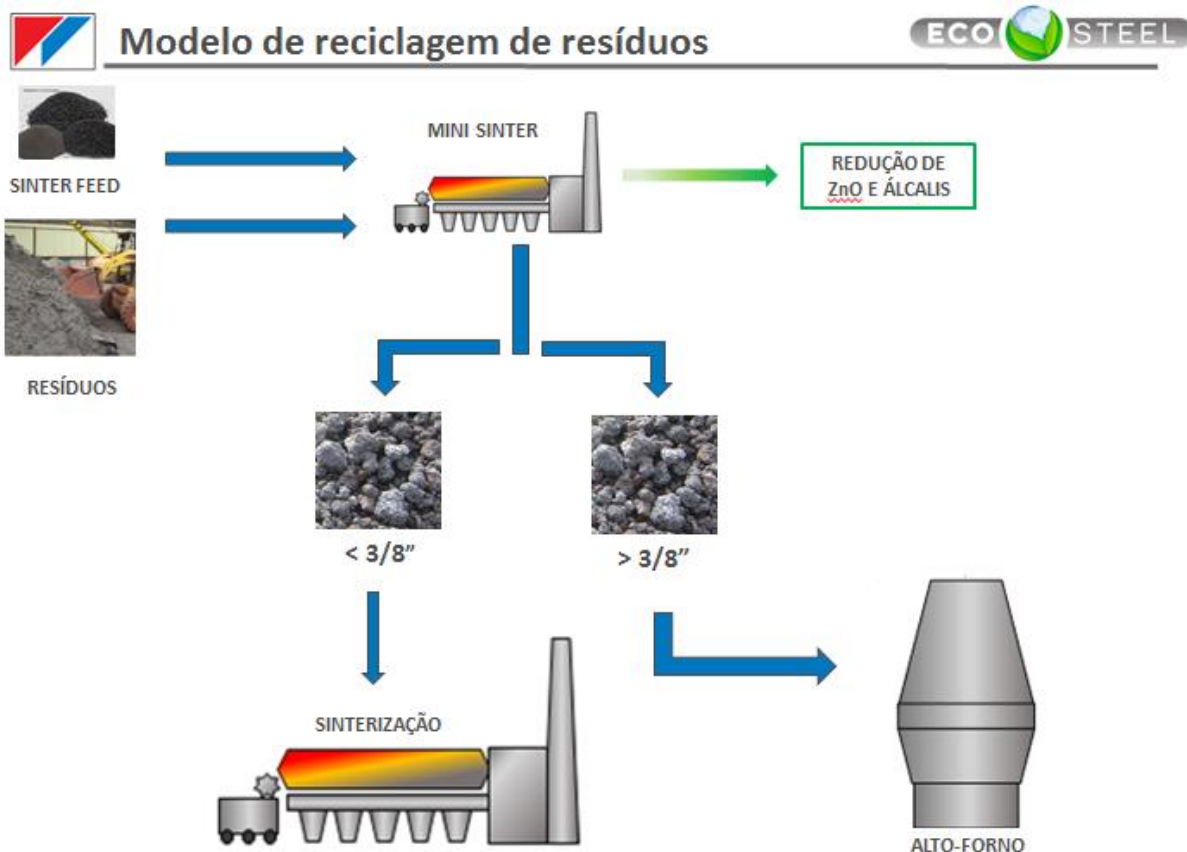


Figura 1. Diagrama do modelo de reciclagem de resíduos

Em uma segunda etapa, os resultados da primeira etapa foram usados como entrada para uma avaliação econômica do processo, considerando-se todos os custos operacionais da planta de mini sinterização para processamento de resíduos. Esses resultados foram contabilizados em termos das vantagens geradas com o processamento e uso do sinter, a fim de se realizar o balanço econômico do modelo.

2.1 Balanço de Massa e Energia

Para realizar os cálculos da primeira fase, escolheu-se uma produção de nominal de sinter de 500.000 toneladas por ano. As tabelas 1, 2 e 3 resumem as propriedades e disponibilidade dos materiais considerados no estudo.

Tabela 1. Resíduos sólidos considerados no estudo: caracterização química

	FeT	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	ZnO	PPC	C	Umidade
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1 Lama grossa aciaria	79,60	1,55	10,30	0,25	3,10	0,00	0,15	0,00	0,21	0,09	1,09	5,00	0,90	20,90
2 Lama fina aciaria	54,50	1,23	10,95	0,13	2,88	0,00	0,12	0,00	0,20	0,00	0,85	5,00	1,20	22,30
3 Pó - Coletor de pó alto-forno	43,10	9,50	1,05	1,50	1,00	0,70	0,06	0,50	0,10	0,15	0,04	30,00	21,30	4,20
4 Carepa Laminação	71,90	0,43	0,12	0,22	0,07	0,33	0,07	0,01	0,04	0,03	0,00	1,46	0,66	1,00
5 Carepa aciaria	72,10	2,60	3,20	0,49	0,27	0,74	0,03	0,00	0,69	0,07	0,00	1,47	0,35	7,10
6 Material de limpeza industrial	43,20	14,30	2,20	2,70	2,01	0,50	0,09	0,02	0,10	0,05	0,02	4,00	4,30	6,80

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



Tabela 2. Resíduos sólidos considerados no estudo: caracterização física

	> 1 mm (%)	0,150/1 mm (%)	< 0,150 mm (%)
1 Lama grossa aciaria	0,00	0,00	100,00
2 Lama fina aciaria	0,00	0,00	100,00
3 Pó - Coletor de pó alto-forno	0,00	0,00	100,00
4 Carepa Laminação	4,90	3,90	91,20
5 Carepa aciaria	4,20	44,60	51,20
6 Material de limpeza industrial	44,70	25,00	30,30

Tabela 3. Resíduos sólidos considerados no estudo: disponibilidade

	Massa t/mês	Massa t/ano
1 Lama grossa aciaria	4.000	48.000
2 Lama fina aciaria	8.000	96.000
3 Pó - Coletor de pó alto-forno	5.000	60.000
4 Carepa Laminação	3.000	36.000
5 Carepa aciaria	3.000	36.000
6 Material de limpeza industrial	10.000	120.000

Realizou-se um balanço de massa dos materiais acima em um modelo próprio de balanço para uma sinterização.

A fim de se atingir a produção nominal escolhida, as matérias-primas foram complementadas com minério de ferro (*sinter feed*). Considerou-se um minério de ferro com as propriedades conforme as tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Minério de ferro considerado: caracterização química

	FeT (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	MgO (%)	P (%)	TiO ₂ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	ZnO (%)	PPC (%)	Umíd (%)
Minério de ferro	63,00	7,00	0,00	1,40	0,22	0,30	0,03	0,00	0,01	0,01	0,01	3,10	7,10

Tabela 5. Minério de ferro considerado: caracterização física

	> 1 mm (%)	0,150 / 1 mm (%)	< 0,150 mm (%)
Minério de ferro	49,8	21,30	28,90

Especificou-se a basicidade binária de 1,6 para adequar a quantidade de fundente a ser adicionada ao sinter (cal ou calcário). A basicidade pode ser ajustada e não é um parâmetro fixo no modelo.

Em seguida realizou-se o balanço de energia com base na quantidade de carbono disponível nos resíduos e no requerimento energético da tecnologia de mini sinterização Paul Wurth.

Os balanços mássicos e energéticos forneceram a quantidade de resíduos a serem consumidos na sinterização, a quantidade minério de ferro (*sinter feed*) a ser adicionado para complementar a produção, assim como a quantidade de consumíveis a serem usados na planta.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



2.2 Viabilidade Econômica

A partir dos dados de consumo obtidos dos balanços, realizou-se a análise econômica do modelo. Essa análise teve como base a contabilização de todos os custos envolvidos no processamento dos resíduos e todos os benefícios obtidos na utilização do sínter envolvido. Os parâmetros e premissas adotados estão listados na tabela abaixo.

Tabela 6. Premissas consideradas no balanço econômico do modelo

Custos considerados	Premissa adotada
Custos dos resíduos para a sinterização	Custo interno da usina
Custo de processamento do sínter	
Energia elétrica	Custo de mercado
Gás	Custo de mercado
Água	Custo de mercado
Combustível para máquinas	Custo de mercado
Custos administrativos	Valor estimado
Custos de mão-de-obra	Valores de referência
Custos de manutenção	Valor estimado
Custo de implantação da mini sinterização (CAPEX)	Custo do projeto de sinterização
Outros custos	Valor estimado
Vantagens consideradas	Premissa adotada
Economia de matéria-prima no alto-forno (granulado/pelota)	Custo de mercado do minério/pelota
Aumento de produtividade da sinterização grande	Não considerado
Aumento de produtividade no alto-forno	Não considerado
Venda de escória adicional	Não considerado
Economia de não deposição dos resíduos	Não considerado

Com base nos custos operacionais de processamento dos resíduos e produção do sínter e com base nas considerações de vantagens de utilização do sínter, a vantagem econômica do modelo de processamento de resíduos foi quantificada.

Para o estudo de viabilidade econômica, todos os valores de custos e vantagens obtidas com o processamento dos resíduos e produção do sínter foram baseados em uma produção nominal de gusa de 10.000 toneladas por dia ou 3,5 milhões de toneladas por ano.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Balanço de Massa e Energia

Os balanços forneceram um sínter com propriedades conforma a tabela 7.

Tabela 7. Resultado do balanço de massa: qualidade química do sínter

	Fe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Mn	P	TiO ₂	S	Na ₂ O	K ₂ O	ZnO	B ₂
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	-
Sínter	55,03	7,06	11,27	1,29	1,35	0,36	0,07	0,06	0,00	0,06	0,07	0,15	1,60

Para atingir a produção definida de 500.000 toneladas anuais, foi considerada adição de 257 kg de minério por tonelada de sínter produzido.

O balanço de massa demonstrou ser possível produzir um sínter com composição e propriedades adequadas para carregamento no alto-forno. Estima-se que o sínter terá tamanho médio entre 19 e 21 mm. Pela granulometria estimada do sínter obtido

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



e quantidade de sínter degradado, aproximadamente 80% da produção pode ser carregada diretamente no alto-forno e o restante pode ser usado como nucleante em uma sinterização convencional, conforme mostrado na Figura 1, ou como retorno interno no processo de mini sinterização.

Propriedade marcante no sínter produzido a partir de rejeitos siderúrgicos são os teores de álcalis e zinco relativamente altos, o que pode ser preocupante no momento da utilização do sínter. Entretanto, o modelo adotado, com processamento dos resíduos de forma dedicada na mini sinterização permite a correta dosagem dos rejeitos e o cuidado com o sínter produzido de forma que no balanço global da carga do alto-forno não sejam ultrapassados os limites permitidos de carregamento de zinco e álcalis. Para o caso estudado, considerando-se uma produção de gusa anual de 3 milhões de toneladas, e adicionando-se toda a produção do sínter de resíduo no carregamento do forno, tem-se um impacto adicional de 152 g/t gusa de zinco. O adicional de álcalis seria de 164 g/t gusa.

O impacto do zinco e dos álcalis e a minimização desse impacto, inclusive com menor necessidade de *sinter feed*, estão sendo estudados em um modelo integrado de tratamento de resíduos desenvolvido pela Paul Wurth e pela Ecosteel, que inclui mini sinterização e mini alto-forno projetado para trabalhar com alta concentração de zinco. Este modelo será estudado em detalhe em outro momento.

Após o balanço de massa procedeu-se com o balanço de energia, que complementou a definição dos consumíveis necessários para plena operação e processamento dos resíduos na mini sinterização. Esses dados estão dispostos na tabela abaixo.

Tabela 8. Consumos da sinterização para processamento de resíduos

Utilidade	Cal kg/t	Comb. Sólido kg/t	Gás ignição Nm ³ /t	Energia elétrica kWh/t	Água m ³ /t
Consumo	31,5	5	2,6	40	0,4

O consumo de combustível sólido (coque ou carvão vegetal) da planta de sinterização de resíduos é consideravelmente pequeno quando comparado a uma sinterização convencional, já que muitos dos resíduos trazem carbono em sua composição.

3.2 Viabilidade Econômica

Com os resultados demonstrados no item anterior e com as considerações dadas na Tabela 2, pôde-se realizar o balanço econômico do modelo. O balanço foi feito com base em uma produção nominal de gusa de 3,5 milhões de toneladas anuais. Diversas simulações foram realizadas com diferentes custos para os consumíveis e matérias primas (ver Tabela 2). Na maioria dos cenários estudados, o processo prevê um retorno significativo com consideração de todos os custos e considerando-se apenas a vantagem de economia de matéria-prima no alto-forno (substituição de minério granulado ou pelota pelo sínter de resíduos). O gráfico abaixo mostra um dos cenários estudados que representa de forma média o retorno calculado, de aproximadamente R\$ 30 por tonelada de gusa ou próximo a R\$ 100 milhões anuais.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

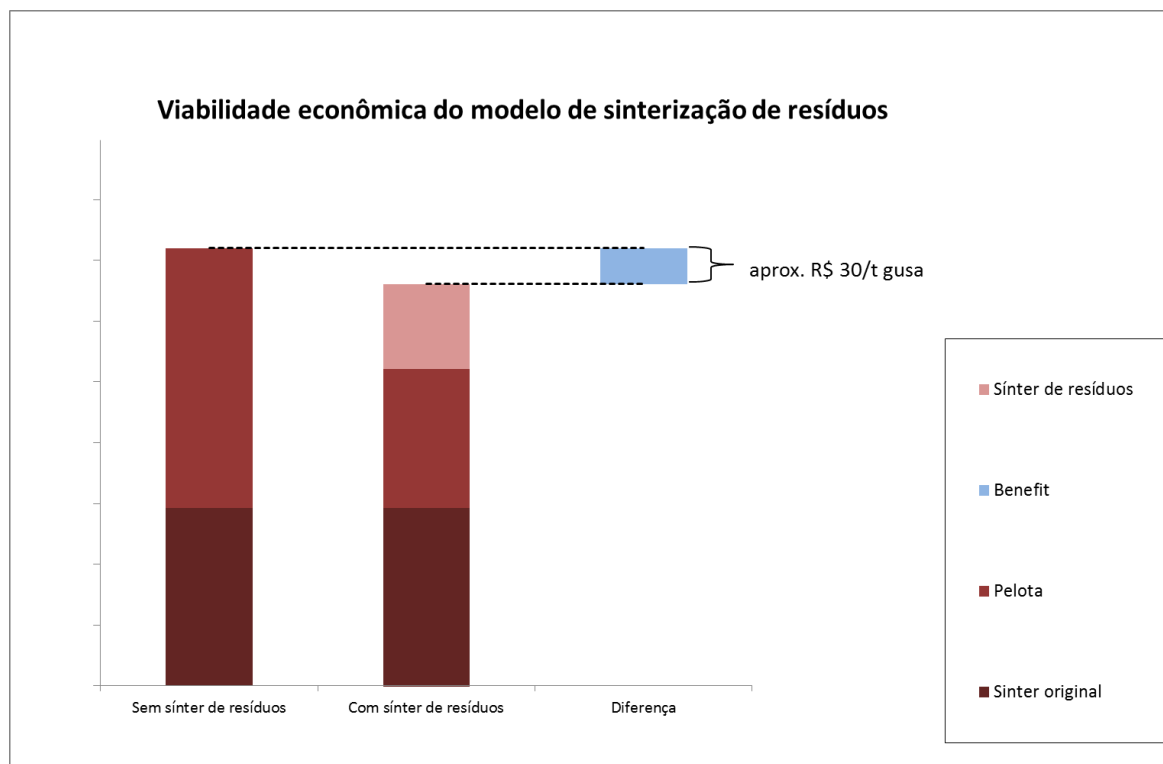


Figura 2. Análise de viabilidade econômica (estudo de caso) do modelo

4 CONCLUSÃO

O modelo de processamento de resíduos siderúrgicos, quando analisado conceitualmente, se mostra viável tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. O estudo de caso com materiais de qualidade e quantidade típicos resulta em um sinter de qualidade apropriada para carregamento no alto-forno. Após contabilização dos custos de processamento e das vantagens obtidas no processo, em especial a troca de matéria-prima nobre pelo sinter de resíduos, o benefício obtido por tonelada de gusa produzido é significativo.

REFERÊNCIAS

- 1 World Steel Association. Steel production 2013. [acesso em 26 mai 2014] Disponível em: <http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive/2013-steel-production.html>.
- 2 Mengerfassung Stäube/Schlämme/Walzzunder. FEhS Institut für Baustoff Forschung, Kreislaufwirtschaft in der Stahlindustrie. Salzgitter, Alemanha, 2013.

* *Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*