

EFEITO DA GRANULOMETRIA DO SINTER EM SUA REDUTIBILIDADE*

*João José dos Santos Carvalho¹
Leonardo Passos Perdigão²
Bruno Pinheiro Silva³
Flávio Túlio Busatto⁴
Filipe Mansur⁵
Elisa Gratz Pereira⁶*

Resumo

O sinter tem alta participação na carga ferrífera dos Altos Fornos da ArcelorMittal Tubarão, sendo portanto de suma importância o controle constante de suas qualidades física, química e metalúrgica, visando o cumprimento da qualidade requerida do cliente. Diante dos grandes desafios face às condições de variação de mercado, as siderúrgicas buscam sustentabilidade de suas operações, visando estabilidade e a redução de custos. Um dos principais passos para a obtenção destes resultados nos altos fornos é a estabilização da qualidade das matérias primas de forma a garantir o perfeito controle de distribuição de carga e um melhor aproveitamento do gás redutor no interior do reator, objetivando um menor consumo de combustíveis. Sabe-se que quanto menor for uma partícula ferrífera melhor será sua redutibilidade, já que uma maior área superficial proporciona maior contato com o agente redutor. Com base neste conceito, o objetivo deste trabalho é quantificar o efeito do tamanho do sinter produzido na sinterização da ArcelorMittal Tubarão em sua redutibilidade, e desta forma possibilitar a definição de uma melhor distribuição granulométrica do sinter visando um equilíbrio entre os efeitos de permeabilidade e de rendimento gasoso nos altos fornos. Adicionalmente, foram avaliados os efeitos da redutibilidade na redução de tamanho do sinter, onde a fração de 5 a 10 mm foi analisada em duas amostras de sinter, a primeira obtida da rota convencional e a segunda após britagem da fração acima de 50 mm, a fim de simular o efeito do uso de um Britador Secundário na Sinterização.

Palavras-chave: Granulometria do sinter; Redutibilidade do sinter; Britador Secundário; Alto Forno.

SINTER GRANULOMETRY EFFECT ON ITS REDUCIBILITY

Abstract

Sinter has high participation in the blast furnaces ferrous burden in ArcelorMittal Tubarão, being therefore of paramount importance the constant control of its physical, chemical and metallurgical qualities, aiming at the fulfillment of the client required quality. With the great challenges faced by market conditions, steelmaking companies seek operational sustainability, aiming at stability and reducing costs. One of the main steps to obtain these results in the Blast Furnaces is the raw materials quality stabilization, in order to guarantee the perfect burden distribution control and a better use of the reductant gas inside the reactor, aiming a lower fuels consumption. It is known that the smaller a ferrous particle is, better its reducibility, since a larger surface area provides greater contact with the reductant agent. Based on this concept, the objective of this work is to quantify the effect of the sinter size produced in ArcelorMittal Tubarão Sinter Plant in its reducibility, and in this way enable the definition of a better sinter particle size distribution aiming at a balance between the permeability effects and gaseous yield in the Blast Furnaces. In addition, the reducibility effects on sinter size reduction were evaluated, where the 5 to 10 mm fraction was analyzed in two sinter samples, the first obtained from the conventional route and the second after crushing of the fraction over 50 mm, in order to simulate the effect of the use of a Secondary Crusher in Sintering.

Keywords: Sinter granulometry; Sinter reducibility; Secondary Crusher; Blast Furnace.

* Contribuição técnica ao 49º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 7º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, parte integrante da ABM Week 2019, realizada de 01 a 03 de outubro de 2019, São Paulo, SP, Brasil.

- ¹ Engenharia Metalúrgica e Mestrado em Engenharia Metalúrgica e Materiais, Especialista de Alto Forno, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo, Brasil.
- ² Engenharia Metalúrgica, Gerente da Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo, Brasil
- ³ Engenharia Metalúrgica, Especialista de Alto Forno, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo, Brasil.
- ⁴ Engenharia Metalúrgica, Especialista da Sinterização, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo, Brasil.
- ⁵ Engenharia Metalúrgica, Pesquisador, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo, Brasil.
- ⁶ Engenharia Metalúrgica, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil..

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade operacional de um alto forno está diretamente ligada à consistência das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas das suas matérias-primas. O sinter compõe elevado percentual da carga ferrífera dos altos fornos da ArcelorMittal Tubarão (AMT), sendo de suma importância o controle de suas qualidades física, química e metalúrgica, visando uma marcha estável no alto forno e o cumprimento da qualidade do gusa requerida pela Aciaria. Um importante fator para definição da qualidade dos materiais ferríferos é seu índice de redutibilidade, que determina a quantidade de oxigênio removido pelo gás redutor durante um tempo determinado, ou taxa pela qual uma carga de óxido de minério de ferro é convertida em ferro metálico pela ação de um gás redutor [1]. A redutibilidade do sinter está relacionada à sua estrutura mineral, área superficial e porosidade. A redutibilidade das fases minerais presentes no sinter diminui na seguinte ordem:

Hematita > ferrita de cálcio > magnetita > Olivinas ((Mg,Fe)₂SiO₄) [1].

Tanto a hematita quanto a magnetita são rapidamente reduzidas a wustita, mas as taxas de redução diferem na posterior redução de wustita a ferro puro. A partir da hematita, a wustita é reduzida rápida e homoganeamente, mesmo quando parte dela fica cercada de metal. A partir da magnetita, a redução é topoquímica e quase todos os grãos são rapidamente cercados pelo metal que neste caso retarda futuras reações de redução. Conforme salientado por Loo (1998), o teor de FeO é utilizado como um indicador para os valores dos índices de redutibilidade e RDI. A Figura 1 relaciona o índice de redutibilidade com o teor de FeO no sinter para algumas faixas de basicidade [1].

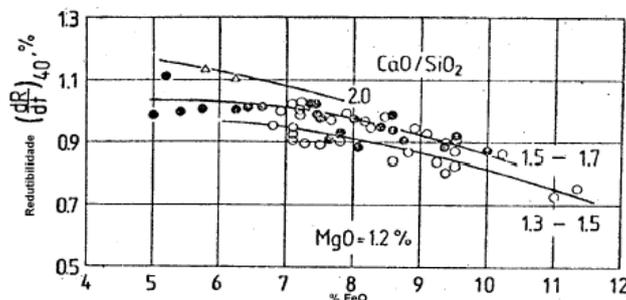


Figura 1. Relação entre o índice de redutibilidade e o teor de FeO [1].

Um fator que está diretamente relacionado com a redutibilidade do sinter é sua granulometria, já que um dos fatores na cinética química determinante para a velocidade das reações é a superfície de contato entre as substâncias reagentes. Quanto menores forem as dimensões das partículas dos materiais reagentes, maior será a área superficial total exposta por grama de sinter, o que permite um melhor contato a qualquer instante, sendo maior a velocidade com que a reação se processa [3]. A figura 2 mostra uma evidência disso nos resultados realizados por Stahleisen-Prufblatt entre o tamanho e a taxa de redução de minérios bitolados de diferentes regiões [4].

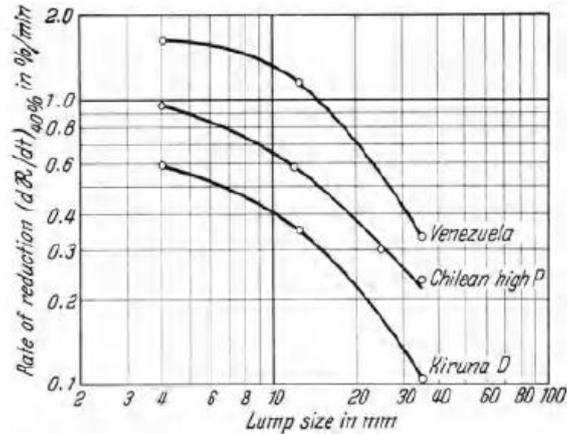


Figura 2. Relação entre o tamanho e a taxa de redução de minérios bitolados de diferentes regiões, testado de acordo com Stahleisen-Prufblatt 1170-64 639 [4].

No alto forno a redutibilidade da carga é controlada pelo contato entre o gás e as partículas da carga como um todo, assim como a difusão do gás nas partículas. A adequada distribuição desses contatos no alto forno é governada pela distribuição de carga e a permeabilidade das camadas, que determinam o fluxo de gás no interior do alto forno. A redutibilidade da carga torna-se menos significativa se o fluxo de gás não permitir contato suficiente para as reações ocorrerem [3].

A permeabilidade da carga é então responsável pela passagem do gás redutor em contra corrente com a carga descendente no interior do alto forno. Quando há uma grande geração de finos, a permeabilidade do reator fica comprometida, diminuindo o ritmo da produção [5]. A heterogeneidade das partículas cria uma região de menor fração de vazios e de maior resistência à passagem dos gases (região de maior queda de pressão), afetando a permeabilidade do alto forno e gerando resistência do gás ao longo da distribuição de partículas finas/ grossa [4].

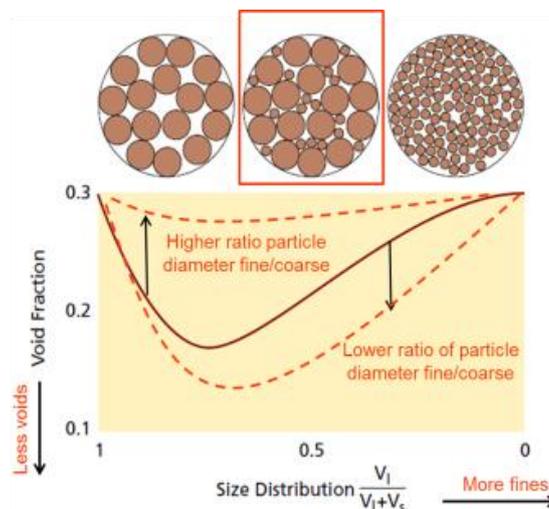


Figura 3. Distribuição de Finos versus fração de vazios [4].

A permeabilidade é um índice que quantifica a facilidade de escoamento dos gases pelo corpo do alto-forno, e é representada pela equação 1 abaixo:

$$P_c = \frac{V_g}{(P_s - P_t)} \quad (1)$$

Onde:

P_c = permeabilidade da carga ($\text{Nm}^3/\text{h.atm}$);

V_g = volume de gás que atravessa o alto forno por unidade de tempo (Nm^3/h);

P_s = pressão do ar no alto-forno (atm);

P_t = pressão do gás no topo do alto-forno (atm) [5].

Portanto, ao mesmo tempo em que partículas menores de sinter melhoram sua redutibilidade, elas não podem ser muito finas a ponto de prejudicar a permeabilidade do alto forno. Segundo Xiang a proporção de finos < 5 mm na carga de um alto forno não deveria exceder 3~5%. A cada 1% a menos de finos carregado, existe um potencial de ganho em 0,5% no coke rate [6]. Há ainda uma tabela referência que correlaciona o impacto do aumento de finos no coke rate dos Altos Fornos denominada Regras de Ouro “The Rules of Thumb” mostrado na tabela 1[7].

Tabela 1. Regras de Ouro para estimar alterações no coke rate dos altos fornos.

Process / Raw Material Variable	Parameter	Increase	Coke Rate Change (lbs/NTHM)
Ferrous Burden	2 in. x 4 in.	100 lbs/NTHM	+15
	1 in. x 2 in.	100 lbs/NTHM	+9
	1/2 in. x 1 in.	100 lbs/NTHM	+3
	1/4 in. x 1/2 in.	100 lbs/NTHM	0
	-1/4 in.	100 lbs/NTHM	+8

O objetivo deste trabalho é quantificar o efeito do tamanho do sinter produzido na Sinterização da ArcelorMittal Tubarão em sua redutibilidade, e desta forma possibilitar a definição de uma melhor distribuição granulométrica do sinter visando um equilíbrio entre os efeitos de permeabilidade e de rendimento gasoso nos altos fornos. Adicionalmente, foram avaliados os efeitos da redutibilidade na redução de tamanho do sinter, onde a fração de 5 a 10 mm foi analisada em duas amostras de sinter, a primeira obtida da rota convencional e a segunda após britagem da fração acima de 50 mm, a fim de simular o efeito do uso de um Britador Secundário na Sinterização.

2 DESENVOLVIMENTO

Foram definidas duas etapas de realização dos testes de redutibilidade baseadas na norma JIS M 8713 para o desenvolvimento deste trabalho:

(1) Realização de testes do índice de redutibilidade (RI) do sinter no Laboratório de Matérias Primas da AMT em diferentes faixas granulométricas e em qualidades químicas distintas (basicidades em 1,80 e 2,12), visando analisar se os comportamentos de redutibilidade versus sua granulometria segue um padrão independente de sua qualidade química;

(2) Realização de testes de RI do sinter na faixa de 5 a 10 mm, proveniente do peneiramento do sinter produto e após o processo de britagem da fração granulométrica >50 mm.

Em ambas as etapas, a metodologia do teste de RI baseou-se na norma JIS M 8713, onde os principais procedimentos operacionais foram os seguintes:

- Classificação da amostra na faixa granulométrica a ser analisada;
- Separação de 500g de material nesta faixa (P_i);
- Colocação da amostra em uma retorta, sendo submetida à redução pela passagem de gás (30%CO e 70% N_2 ; vazão de gás = 15 NI/min, à temperatura de 900°C durante 180 min);

- Resfriamento da amostra e determinação do seu peso final (Pf).
O resultado do RI foi calculado conforme a equação 2:

$$R.I. (%) = \frac{P_i - P_f}{\frac{P_i}{100}[(\%FeT \times 0,429) - (\%FeT \times 0,111)]} \times 100 \quad (2)$$

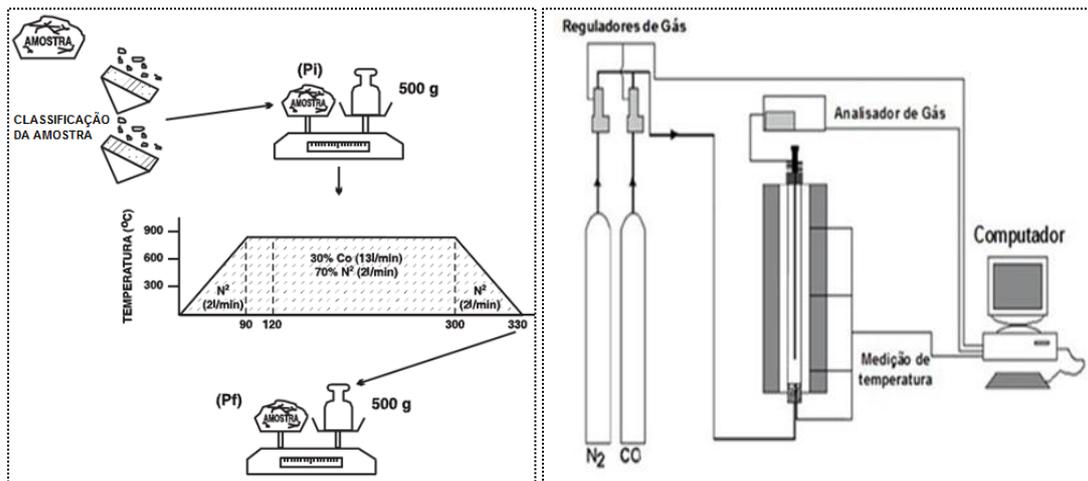


Figura 4. (a) Esquema da metodologia do teste de RI do sinter, norma JIS M 8713; **(b)** Forno de Redução Laboratório de Matérias Primas da AMT.

Para a realização da primeira etapa dos testes foi separado um total de 14 amostras classificadas em frações granulométricas distintas, sendo definidas como X1 a X7 as amostras de sinter de menor basicidade (sinter X, com B2=1,80) e Y1 a Y7 as amostras de sinter de maior basicidade (sinter Y, com B2=2,12). A tabela 2a mostra a especificação de todos os testes realizados por faixa granulométrica e a tabela 2b, a composição química de cada sinter utilizado.

Tabela 2. (a) Especificação dos testes realizados **(b)** Composição química das amostras de sinter.

Amostra	Faixas (mm)	Teste		Composição Química			
				Sinter X	Sinter Y	Sinter Z	
1	5 a 10	X1	Y1	FeT	56,50	53,52	55,90
2	10 a 15	X2	Y2	SiO ₂	6,30	6,80	6,67
3 - Padrão	15 a 20	X3	Y3	Al ₂ O ₃	0,70	0,75	0,41
4	20 a 25	X4	Y4	CaO	11,35	14,39	11,80
5	25 a 30	X5	Y5	MgO	1,20	1,70	1,41
6	30 a 40	X6	Y6	TiO ₂	0,09	0,06	0,06
7	40 a 50	X7	Y7	Mn	0,37	0,34	0,31
8	5 a 10	Z1 - Fração peneirada do sinter produto		P	0,06	0,06	0,04
				SiO ₂	0,03	0,04	0,03
9	5 a 10	Z2 - Fração peneirada após britagem da fração >50 mm		Zn	0,00	0,01	0,02
				ZnO	0,00	0,01	0,02
				K ₂ O	0,05	0,05	0,06
				Na ₂ O	0,05	0,04	0,04
				B2	1,80	2,12	1,77

A amostra padrão foi classificada pela fração de 15 a 20 mm e usada como referência para comparação do desvio de redutibilidade das demais frações. Na segunda etapa de testes foram separadas apenas 2 amostras (Z1 e Z2) de um mesmo sinter produto (sinter Z), uma delas representando a fração peneirada em 5 a 10 mm (Z1) e a outra representando a fração de 5 a 10 mm proveniente da

britagem da fração >50 mm (Z2), onde a qualidade da amostra (Z) pode ser observada na tabela 2a e 2b.

Após realização dos testes, os resultados foram plotados em uma curva de redutibilidade do sinter versus granulometria, conforme as figuras 5 e 6. A faixa destacada nos gráficos representa a fração granulométrica padrão (16 a 20 mm), conforme a norma JIS M 8713. Pode ser observado que há uma diminuição na redutibilidade quando aumenta o tamanho do sinter e um aumento de redutibilidade na redução do tamanho, esse fenômeno ocorre face à maior área disponível para o contato com o gás redutor CO. Para o teste realizado com o sinter X, figura 5, houve uma perda de 42% na redutibilidade do sinter na fração entre 40 a 50 mm quando comparado à faixa padrão de teste.

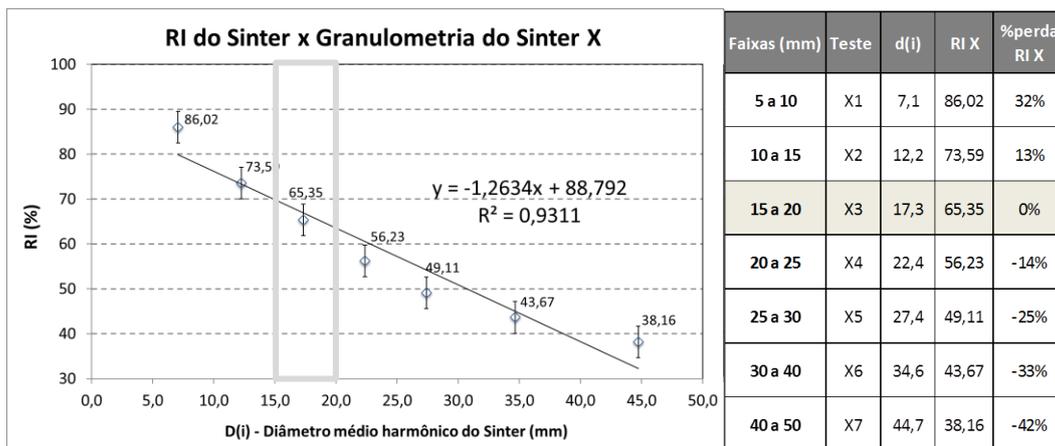


Figura 5. Resultados do ensaio de redutibilidade x granulometria do sinter X.

Para o teste realizado com o sinter Y, figura 6, houve uma perda de 36% na redutibilidade do sinter na fração entre 40 a 50 mm quando comparado à faixa padrão de teste.

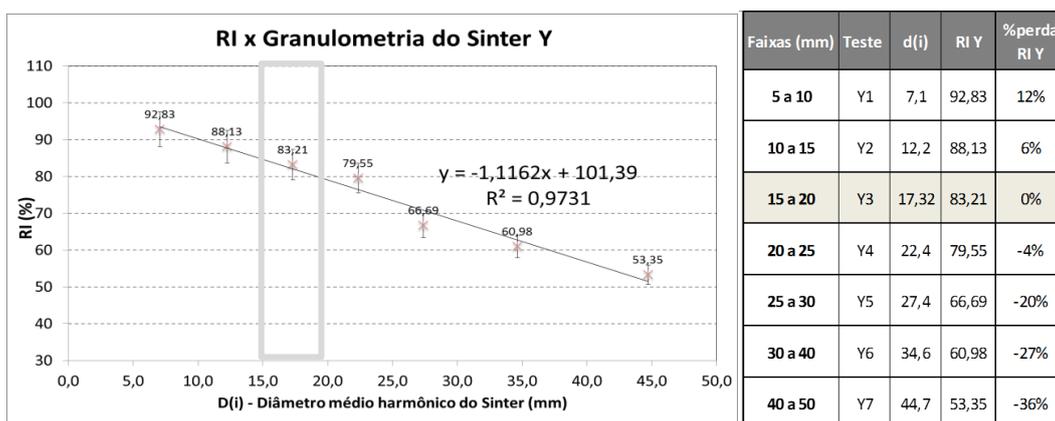


Figura 6. Resultados do ensaio de redutibilidade x granulometria do sinter Y.

Quando comparamos as curvas obtidas pelos ensaios de redutibilidade das amostras X1-7 e Y1-7, com composições químicas distintas, os coeficientes angulares são próximos, e ao calcular a diferença entre a redutibilidade para cada diâmetro com a redutibilidade do diâmetro harmônico do ensaio padrão (17,3mm), nota-se que a perda de redutibilidade das duas curvas é similar desviando em 8% apenas para elevados diâmetros como apresentado na figura 7.

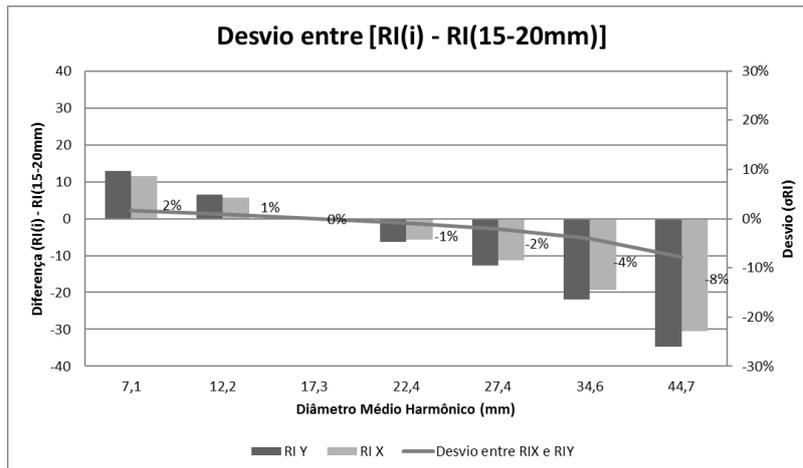


Figura 7. Desvio das equações de redutibilidade das amostras X1-7 e Y1-7.

Visando corrigir a redutibilidade média do sinter produto mediante a variação de sua granulometria, foi considerada a relação entre os resultados de redutibilidade obtidos nas diferentes faixas granulométricas e a amostra padrão para o ensaio de RI, segundo a equação 3, e encontrados os fatores para cada faixa granulométrica dos sinteres X e Y, conforme apresentado na tabela 3.

$$Fator Fn = \frac{RI_{X,Y}}{RI_{padrão}} \quad (3)$$

Tabela 3. Fatores de RI do sinter por faixa granulométrica.

Fn		F1	F2	F3	F4	F5
Faixas granulométricas		>50 mm	25 a 50 mm	10 a 25 mm	05 a 10 mm	<05 mm
Fatores de RI das amostras	Sinter X	0,58	0,73	1,01	1,12	1,23
	Sinter Y	0,42	0,67	1,00	1,32	1,38

Com os fatores específicos para cada faixa granulométrica e a partir dos resultados reais de RI do sinter para a faixa padrão do ensaio JIS M 8713, foi calculado um índice de redutibilidade representativo “RI_{rep}” para diferentes resultados reais de granulometria do sinter, seguindo a equação 4 abaixo, onde %X_n representa a porcentagem da respectiva fração granulométrica na massa total da amostra.

$$RI_{rep} = RI_{real} \times \left(\sum_{x=1}^n Fn \times \%X_n \right), \quad (4)$$

Os resultados de RI representativo calculado através da equação 4 apresentou forte correlação (R² de 91,8%) com o RI real medido do sinter na faixa padrão de 15 a 20 mm, conforme mostrado na figura 8a.

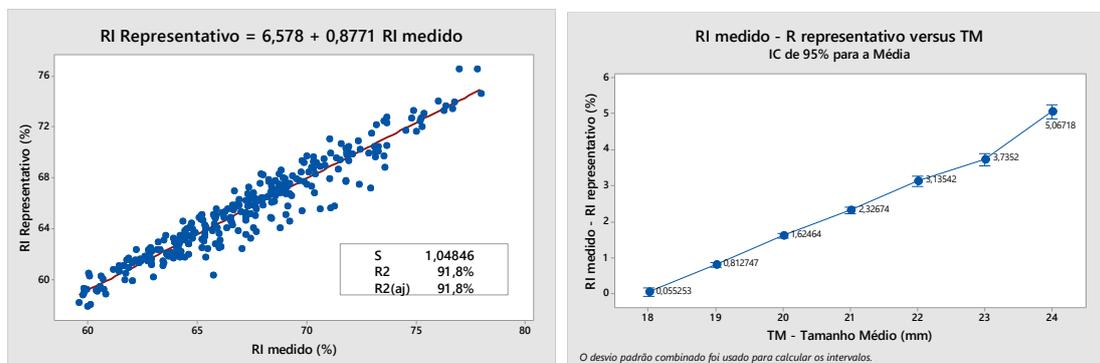


Figura 8. (a) Correlação entre RI medido versus RI representativo e (b) desvio do RI para cada TM.

Observa-se na figura 8b através da análise de variância (ANOVA), que com o tamanho médio do sinter a 18 mm o RI representativo foi estatisticamente idêntico ao RI real, no entanto à medida que o tamanho médio do sinter aumenta em relação ao do ensaio padrão, ocorre um aumento no desvio entre o RI representativo e o real, sendo o efeito da perda da área superficial correspondente ao impacto mostrado nas figuras 5 e 6.

Através da equação 4 foi possível simular o comportamento de redutibilidade do sinter com a variação da granulometria do mesmo. Na figura 9 foi calculado o efeito do aumento da fração > 50 mm na redutibilidade do sinter simulando uma redução proporcional da fração de 10 a 25 mm. Observa-se que a cada aumento de 5% na fração >50 mm há uma perda 1,54 pontos absolutos na redutibilidade do sinter, e a cada 5% de elevação da fração < 5 mm há um ganho de 0,73 pontos absolutos na redutibilidade do sinter.

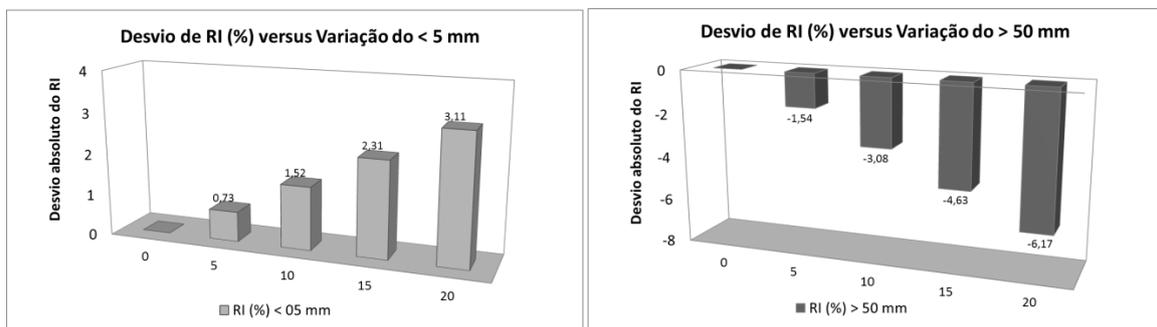


Figura 9. (a) Resultados entre variação da fração > 50mm e (b) < 5mm versus redutibilidade.

Busca-se em um alto forno ações para redução do consumo de combustível, que por sua vez está ligado a um melhor rendimento do gás redutor CO gerado no reator, ou seja, objetiva-se garantir o máximo aproveitamento deste gás na redução dos óxidos de ferro da carga metálica (gerando CO₂) otimizando a relação CO/CO₂ medida no gás do topo do alto forno. Os resultados reais medidos durante a operação dos Altos Fornos da AMT comprovam um impacto da elevação da fração grossa do sinter (fração > 50 mm) que inicialmente era entendido apenas pelo impacto na permeabilidade do leito, agora pode ser interpretado como um somatório da perda de permeabilidade e redutibilidade, gerando uma perda do rendimento gasoso medido pela relação CO/CO₂, conforme mostrado na figura 10, 11 e 12.

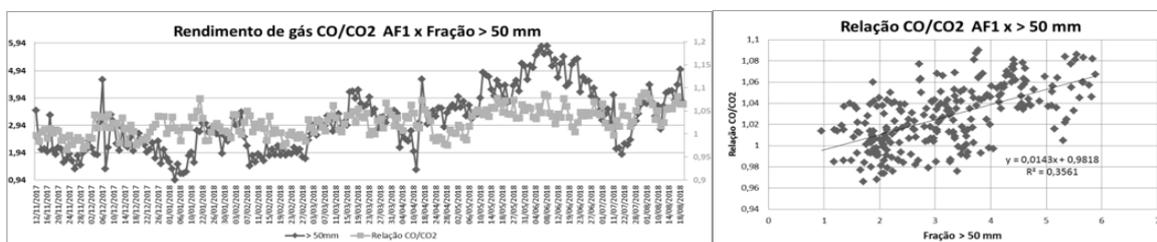


Figura 10 – Rendimento de gás CO/CO₂ no Alto Forno 1 da AMT versus fração > 50 mm do sinter.

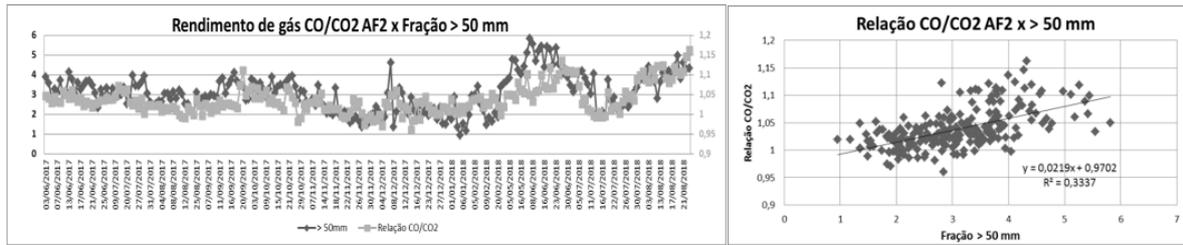


Figura 11 – Rendimento de gás CO/CO₂ no Alto Forno 2 da AMT versus fração > 50 mm do sinter.

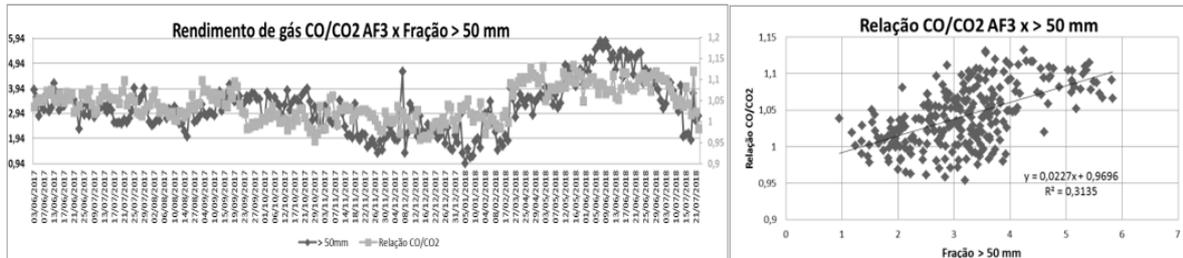


Figura 12 – Rendimento de gás CO/CO₂ no Alto Forno 3 da AMT versus fração > 50 mm do sinter.

Uma maior redutibilidade do sinter corresponde a uma maior velocidade de reação e menor consumo de energia no alto forno. O impacto da perda no rendimento do gás na elevação do fuel rate é conhecido nos altos fornos da AMT conforme mostrado na figura 13.a. A perda no rendimento do gás mostrado na figura 11 afetou a taxa de combustível do alto forno 2 da AMT, conforme correlação entre a fração > 50 mm e o FR apresentado na figura 13.b.

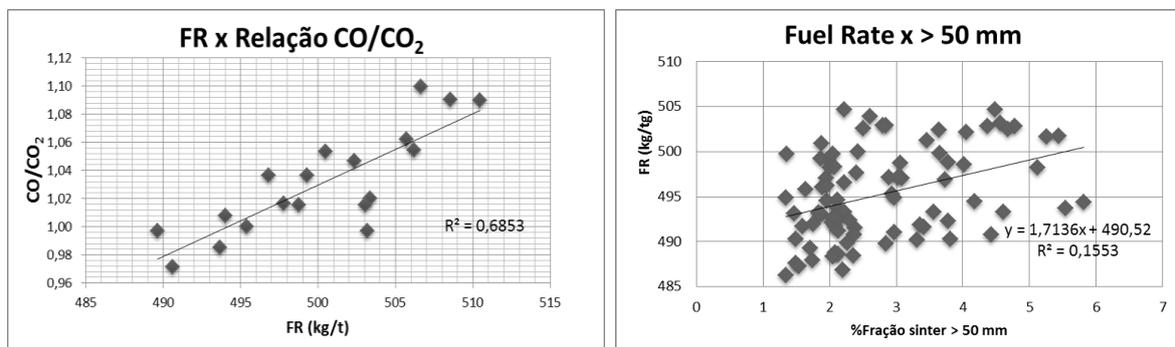


Figura 13. (a) Fuel Rate versus CO/CO₂ (b) Fuel Rate versus fração > 50 mm do sinter.

O aumento da granulometria faz uma redução na redutibilidade dos materiais, porém um afinamento e aumento da dispersão granulométrica do sinter são negativos na operação dos altos fornos. Observa-se na figura 14 evidência da perda de permeabilidade da carga através da elevação da pressão de cuba do Alto Forno 3 da AMT, face à forte variação granulométrica do sinter, ver figura 15, com elevação das frações < 5 mm, redução da fração de 5 a 10 mm, elevação das frações de 25 a 50mm e > 50mm. Gushiken et. al. evidenciou fortes influências da variação granulométrica do sinter, notadamente face a elevação da dispersão granulométrica, como consequência foi observado aumento na escapadas de gás com aumento das temperaturas dos staves dos níveis SR2 e SR3 do alto forno 2 da AMT [8].

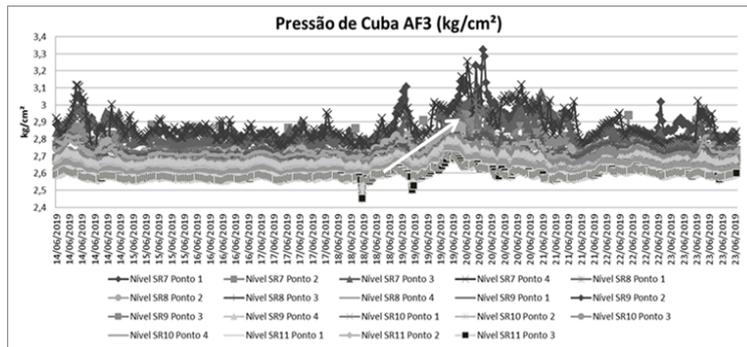


Figura 14. Elevação da pressão de cuba do AF3 da AMT face a variação granulométrica do sinter.

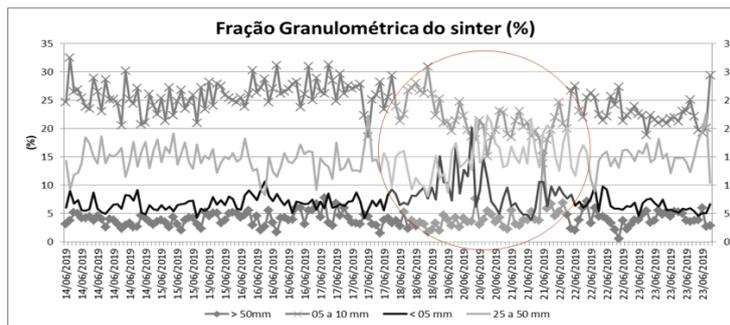


Figura 15. Variação granulométrica do sinter.

De acordo com os resultados encontrados neste trabalho, o aumento da fração grossa do sinter é indesejado ao processo de redução em altos fornos devido a grande perda em sua redutibilidade, além disso, outro ponto observado foi que o aumento das da dispersão granulométrica gera impacto na permeabilidade da carga. Dessa forma, uma das saídas para melhorar a qualidade do sinter produto é o processo de britagem secundária, porém não é conhecido o quão redutível é o sinter após o processo de britagem. Desta forma, foram realizados testes de redutibilidade RI do sinter na fração de 5 a 10 mm para comparação entre o sinter produto (amostra Z1- Teste padrão) e o sinter proveniente do processo de britagem da fração granulométrica > 50mm (amostra Z2 – amostra britada). Os resultados de redutibilidade das amostras ficaram muito próximos tendo um desvio de apenas 0,2% entre os dois ensaios, onde ao estimar a redutibilidade da fração > 50 mm da amostra Z2 foi indicado um ganho de redutibilidade mostrado na tabela 4, logo sugere-se que o sinter de fração de 5 a 10 mm formado a partir da quebra da fração > 50 mm pós britagem possui característica similar ao da amostra de 5 a 10 mm provenientes do primeiro peneiramento.

Tabela 4. Resultados de RI antes e após britagem da fração > 50mm.

Faixas (mm)	Amostra	Ri (%)	Tipo de teste
5-10	Z1	86,0	Teste padrão
5-10	Z2	85,9	Amostra britada
>50	Z2	42,9	Estimado no >50mm

3 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi avaliado o efeito do tamanho do sinter em sua redutibilidade e do impacto no rendimento do gás do alto forno, além de uma avaliação da redutibilidade antes e após britagem da fração de sinter acima de 50 mm. Foi elaborada uma equação considerando a relação entre os resultados de redutibilidade reais obtidos

nas diferentes faixas granulométricas e na faixa padrão do ensaio de redutibilidade seguindo a norma JIS M 8713. Os resultados mostram que:

- Para uma mesma massa de sinter testada, a redução do tamanho do sinter produz um aumento em sua redutibilidade média independente da composição química do sinter analisado;
- Há uma perda de 1,54 pontos absolutos na redutibilidade média do sinter a cada 5% de elevação da fração maior que 50 mm ao simular uma redução proporcional da fração de 10 a 25 mm, e um ganho de 0,73 pontos absolutos na redutibilidade média a cada 5% de elevação da fração menor que 5 mm, simulando uma redução proporcional da fração de 10 a 25 mm;
- A redutibilidade do sinter antes e após britagem da fração maior que 50 mm ficaram muito próximos, logo sugere-se que o sinter de fração de 5 a 10 mm proveniente da britagem da fração acima de 50 mm, possui característica similar à amostra de sinter 5 a 10 mm do primeiro peneiramento do sinter produto, indicando que o processo de britagem da fração grossa reduz os impactos na permeabilidade e melhora a redutibilidade média do sinter;
- A redutibilidade do ensaio padrão de RI da norma JIS M 8713 pode não representar adequadamente o sinter carregado nos altos fornos à medida que o tamanho médio desvia da faixa granulométrica padrão do ensaio.

Sugere-se como continuidade deste trabalho, a realização de análises de microestruturas e o estudo das fases do sinter em diferentes frações granulométricas, correlacionando ao efeito em sua redutibilidade.

Agradecimentos

Agradecimento a Deus, Equipe ArcelorMittal Tubarão, familiares e amigos.

REFERÊNCIAS

- 1 Lopes, MV. Caracterização de Sínter de Minério de Ferro para Uso em Altos-Fornos a Carvão Vegetal [dissertação]. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá; 2012.
- 2 Bogdandy L, Engell HJ. The Reduction of Iron Ores. Oberhausen: Hüttenwerk Oberhausen AG; 1971.
- 3 Físico Química Experimental I. UniVap, https://www1.univap.br/spilling/FQE1/FQE1_EXP3_Cinetica.pdf, acessado em 06/06/2019.
- 4 Geeds M, Toxopeus H, Vliet C. Modern Blast Furnace Ironmaking. 2ª Edição. Amsterdã: IOS Press; 2009.
- 5 Neves L, Teixeira RLP, Gouveia LLA. Estudo do reaproveitamento do gás de topo de alto forno a carvão vegetal para redução do fenômeno de crepitação em granulados de minério de ferro. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. 2015; 2:77-81.
- 6 Zheng-jian LIU, Jian-liang ZHANG, Tian-jun YANG. Low Carbon Operation of Super-Large Blast Furnaces in China. ISIJ International, Vol. 55, No 6, pp. 1146-1156, 2015.
- 7 J.A.Burgo, The Manufacture of Pig Iron in the Blast Furnace, Pittsburgh, PA, 1999.
- 8 Gushiken JI, Régio AA, Dummer, FS, Ferreira, AMM, Harano, ELM, Oliveira, HLM, Mendes, JB, Resende, RG. Controle da fração > 50 mm no sinter produto. XXXII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, ABM, Vila Velha/ES, 131-143, 2002.