



EFEITO DE VARIÁVEIS DE FABRICAÇÃO EM PROPRIEDADES DE AGLOMERADOS CARVÃO FÓSSIL-MINÉRIO DE FERRO OBTIDOS POR BRIQUETAGEM SEGUIDA DE TRATAMENTO TÉRMICO*

César Yuji Narita¹
Marcelo Breda Mourão²
Cyro Takano²
Lina Maria Varon Cardona³
Martim Hideki Nakayama Kurauchi¹

Resumo

Um dos problemas de aglomerados autorredutores utilizando cimento como aglomerante é a sua baixa resistência mecânica a temperaturas acima de 900°C levando-os à degradação durante a redução. Uma nova tecnologia propôs utilizar as propriedades de plasticidade térmica do carvão fóssil coqueificáveis como aglomerante, o que deu origem ao produto conhecido como CCB (Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette). Este trabalho tem como objetivo propor uma rota alternativa para a fabricação dos briquetes autorredutores e estudar o efeito de variáveis de processo na resistência à compressão dos mesmos. O método utilizado na obtenção dos briquetes foi de compactação em matriz cilíndrica de misturas de finos de carvão fóssil coqueificável ($\log(\text{máxima fluidez}) = 2,48$) e minério de ferro (pellet feed) seguida de tratamento térmico. Foram realizados testes variando granulometria do carvão, pressão de compactação, taxa de aquecimento e proporção entre carvão e minério e investigados os efeitos dessas variáveis em relação à resistência à compressão e à densidade dos briquetes produzidos. Foi observado que a resistência à compressão obtida nos briquetes produzidos via briquetagem a frio seguida de tratamento térmico são comparáveis com os CCBs.

Palavras-chave: Autorredução; CCB; Briquetagem; Resistência à compressão.

EFFECT OF PROCESS VARIABLES IN PROPERTIES OF CARBON COMPOSITE IRON ORE MADE BY BRIQUETTING FOLLOWED BY HEAT TREATMENT

Abstract

One of the main issues regarding self-reducing carbon composite iron ore using cement as a binder is its low strength at temperatures above 900°C, leading to degradation during reduction. A new technology was proposed by making use of the thermal plasticity of coking coals as a binder, creating the product known as CCB (Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette). The purpose of this paper is to propose an alternative way of manufacturing self-reducing briquettes and to study the effect of process variables in their compressive strength. The method used to obtain the briquettes was pressing a mixture of fines of coking coal ($\log(\text{max fluidity}) = 2,48$) and pellet feed iron ore in cylindrical dies followed by heat treatment. Tests varying coal size, compacting pressure, heating rate and coal-to-iron ore proportion were carried out and the effects of these variables were investigated with regard to the briquettes compressive strength and apparent density. It has been found that the compressive strength of the briquettes produced by cold briquetting followed by heat treatment is comparable to those found in CCBs.

Keywords: Self-reduction, CCB, Briquetting, Compressive strength.

- ¹ Engenheiro Metalurgista, Mestrando, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- ² Professor Associado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- ³ Engenheira Mecânica, Doutoranda, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 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

A busca pela redução das emissões de gases estufa começou com a criação do Protocolo de Kyoto em 1997 e ainda é um tema recorrente devido à grande quantidade de frentes de pesquisa existentes, já que grande parte dos processos industriais utiliza recursos não renováveis como fonte de energia.

Atualmente, a presença de fontes renováveis na siderurgia é ilustrada pela utilização de carvão vegetal. No entanto, este uso é pouco significativo frente ao uso de carvão fóssil. Portanto, para reduzir a quantidade de gás carbônico emitida na produção de aço seria necessário ou adaptar a estrutura das siderúrgicas convencionais para siderúrgicas a carvão vegetal ou melhorar a eficiência no uso do carvão fóssil, diminuindo o uso do mesmo para a produção de aço. Portanto, a fim de se diminuir o consumo de carbono nos altos-fornos o que se tem pesquisado atualmente é o uso de compósitos de carbono e minério de ferro, o CCB (Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette), como substituto do sinter e do coque como da carga na fabricação do ferro gusa.

Pesquisas sobre aglomerados de minério de ferro e carvão fóssil já vem sendo feitas há tempos por pesquisadores de todo o mundo. Antes do CCB, as pelotas autorredutoras eram o objeto de estudo. Mourão et al. [1], mostram que pelotas autorredutoras são vantajosas devido a sua alta velocidade de reação de redução. Porém, esse tipo de aglomerado esbarra no problema da resistência mecânica a altas temperaturas. Takano et al. [2] estudaram o comportamento mecânico de pelotas autorredutoras aglomeradas com cimento e constatou que elas têm baixa resistência mecânica a temperaturas maiores que 900°C.

Uma abordagem para solucionar o problema da resistência mecânica de aglomerados autorredutores a altas temperaturas é o uso do CCB, apresentado pela primeira vez por Kasai et al. [3]. Nesse estudo foi proposto um novo método para a fabricação desses aglomerados, no qual se aproveita a plasticidade térmica do carvão fóssil como aglomerante. Outras pesquisas envolvendo os aglomerados autorredutores se focaram nos comportamentos da redução e fusão, mecanismos de carburação e efeitos da atmosfera e do carbono na redução [4]. Além disso, testes práticos feitos por Kojima [5] e Kasai [6] com aglomerados autorredutores em altos-fornos ou em simuladores e foi constatado que: o carregamento dos mesmos não afeta a permeabilidade nem a descida da carga no forno, não interferindo negativamente na operação; Redução do minério de ferro nos aglomerados autorredutores começa em zonas de baixas temperaturas e se completa mais rápido comparadas com pelotas ou sinter; Consumo energético tende a diminuir significativamente.

As técnicas de fabricação do CCB encontradas na literatura [7-12] pouco variam de pesquisador para pesquisador, onde as principais variáveis estudadas são: o tipo de carvão (mensurada pela sua fluidez), a temperatura de briquetagem, a temperatura e o tempo de tratamento térmico pós-briquetagem, a proporção entre carvão fóssil e minério de ferro, a granulometria do carvão fóssil e a pressão de compactação.

O presente estudo verifica o efeito que as variáveis granulometria do carvão fóssil, pressão de compactação, proporção entre minério de ferro e carvão, taxa de aquecimento do tratamento térmico e temperatura de tratamento térmico têm na resistência à compressão e densidade dos briquetes autorredutores.

* *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 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nos experimentos foram minério de ferro na forma de pellet feed e carvão fóssil da mina de Chipanga em Moçambique. Ambos os materiais foram doados gentilmente pela Vale.

A composição do pellet feed está mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição do pellet feed

Fe (total)	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn
65,39	0,22	3,01	0,77	0,027	0,274
CaO	P.F.	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O
0,017	1,358	0,046	0,077	-	-

Obs.: valores expressos em % em peso.

A análise imediata e as propriedades plásticas (medidas com Plastômetro Gieseler) do carvão Chipanga estão mostradas na Tabela.

Tabela 2. Análise imediata do carvão Chipanga

Análise Imediata	Matéria Volátil (wt%)	Cinzas (wt%)	Carbono Fixo (wt%)	
	23,76	10,56	65,58	
Plastômetro Gieseler	Temperatura de início de amolecimento (°C)	Temperatura de máxima fluidez (°C)	Temperatura de solidificação (°C)	Máxima fluidez (ddpm)
	403	461	491	305

O pellet feed utilizado em todas as amostras foi seco a 110°C e todas as partículas tinham tamanho menor que 0,251 mm (60 mesh).

O carvão Chipanga foi moído usando pistilo e almofariz e peneirado conforme a necessidade do experimento. Os tamanhos de partícula do carvão foram controlados utilizando o seguinte método:

- Carvão de 32 mesh: 100% do carvão moído passante na peneira de 16 mesh, 20% retido e 80% passante na peneira de 32 mesh;
- Carvão de 60 mesh: 100% do carvão moído passante na peneira de 32 mesh, 20% retido e 80% passante na peneira de 60 mesh;
- Carvão de 100 mesh: 100% do carvão moído passante na peneira de 60 mesh, 20% retido e 80% passante na peneira de 100 mesh;
- Carvão de 150 mesh: 100% do carvão moído passante na peneira de 100 mesh, 20% retido e 80% passante na peneira de 150 mesh;
- Carvão de 200 mesh: 100% do carvão moído passante na peneira de 150 mesh, 20% retido e 80% passante na peneira de 200 mesh;
- Carvão de 270 mesh: 100% do carvão moído passante na peneira de 200 mesh, 20% retido e 80% passante na peneira de 270 mesh.

As proporções entre o pellet feed e o carvão estudadas foram de 80:20, 75:25 e 70:30, em peso.

* 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.



As misturas foram homogeneizadas e compactadas em uma matriz cilíndrica de aço de 11 mm de diâmetro usando uma prensa hidráulica de até cinco toneladas. As alturas dos briquetes variaram de 10 mm até 12 mm antes do tratamento térmico. Os pesos dos briquetes antes do tratamento variaram de 2,30 g até 2,90 g.

Para este estudo as pressões de compactação aplicadas na mistura carvão-minério foram de 268, 576, 804 e 1072 kgf/cm².

Os tratamentos térmicos foram realizados em um forno vertical aquecido a resistências elétricas a 500°C e com vazão de nitrogênio para gerar uma atmosfera inerte. Foram utilizadas três taxas de aquecimento: partindo de temperatura ambiente com taxa de aquecimento de 3°C/min e 10°C/min e outro inserindo a amostra no forno já preaquecido a 500°C.

As amostras foram analisadas quanto à densidade aparente e a resistência à compressão. O teste de resistência à compressão foi realizada em máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL 30000, com capacidade máxima de 300 kN. As amostras eram comprimidas até a ruptura total.

Foram feitos no mínimo três ensaios para cada experimento e foi tirada a média aritmética dos dados obtidos para a construção das tabelas e gráficos dos resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Efeito da Granulometria do Carvão Fóssil na Resistência à Compressão e na Densidade dos Briquetes Autorredutores

Para a análise do efeito da granulometria do carvão fóssil na resistência à compressão e na densidade dos briquetes compostos de carvão fóssil e minério de ferro antes e após tratamento térmico, foram fixadas as variáveis de processo listadas na Tabela 3.

Tabela 3. Variáveis de processo fixadas para estudo do efeito da granulometria do carvão fóssil nas propriedades dos briquetes autorredutores

Pressão de compactação	536 kgf/cm ²
Carvão fóssil	25 % em peso
Minério de ferro (pellet feed)	75% em peso
Granulometria do minério de ferro	<0,251 mm (60 mesh)
Temperatura de tratamento térmico	500°C
Tempo de tratamento térmico	1 hora

A Figura 1 mostra como a granulometria do carvão fóssil influencia na resistência à compressão e na densidade dos briquetes antes e após o tratamento térmico.

* 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.

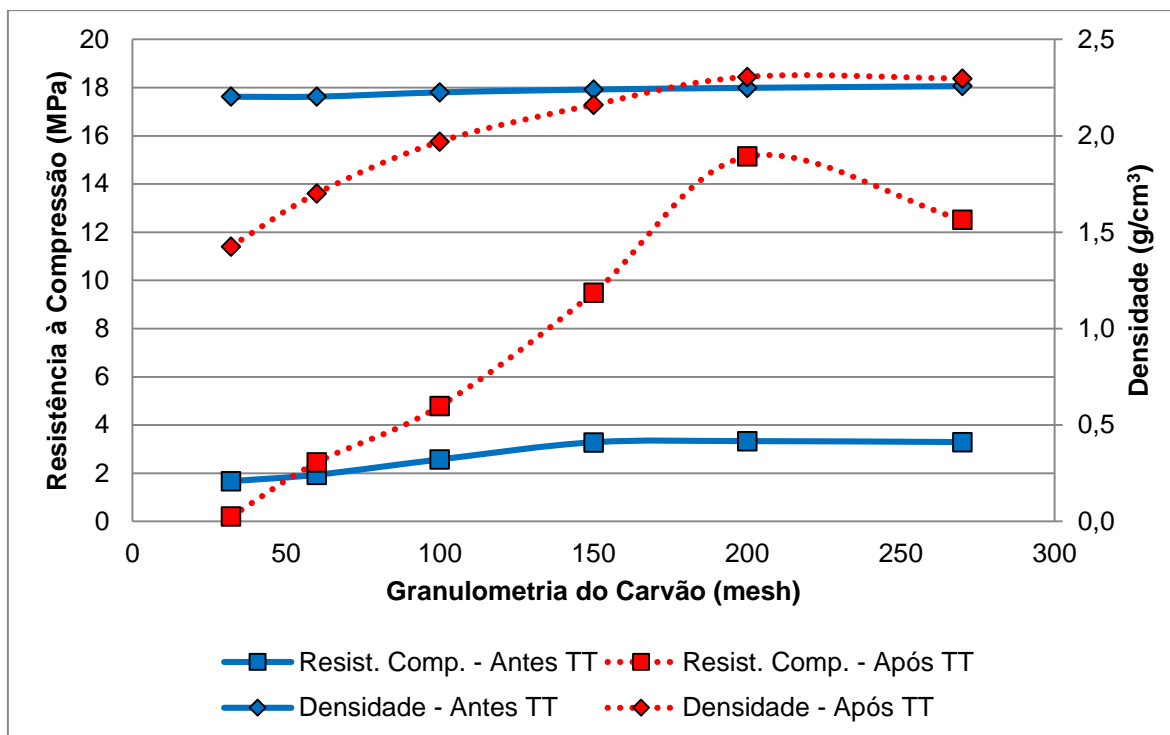


Figura 1. Curvas de resistência à compressão e densidade dos briquetes antes e após o tratamento térmico em função da granulometria do carvão fóssil.

Das curvas da Figura 1 é possível notar que a densidade do briquete produzido tende a aumentar com a diminuição do tamanho das partículas do carvão fóssil, isso devido a maior mobilidade das partículas do carvão de ocuparem os poros. Também se verifica uma melhora na resistência à compressão do briquete produzido com a diminuição do tamanho de partícula do carvão, porém com uma estabilização com o carvão a partir de 150 mesh.

Também é possível notar que assim como nos briquetes antes do tratamento térmico, a densidade aumenta com a diminuição do tamanho de partícula do carvão, com uma estabilização com o carvão a partir de 200 mesh. A resistência à compressão dos briquetes aumenta com a diminuição do tamanho de partícula do carvão, porém, com um máximo na granulometria de 200 mesh, a partir da qual a resistência tende a diminuir.

A possível explicação para esse fenômeno é que quanto menor o tamanho de partícula do carvão, durante o tratamento térmico, mais rápido o carvão passa pelo estado plástico, ou seja, não há tempo suficiente durante a fusão do carvão para que ele aglomere os inertes do briquete, já passando para o estado sólido de semi-coque.

Nota-se das curvas de densidade que os briquetes produzidos com o carvão com granulometria mais grosseira (menor que 200 mesh) gera briquetes tratados termicamente com densidade menor que os originais antes do tratamento térmico. Como visto anteriormente, quanto menor o tamanho de partícula do carvão, menor é a sua fluidez. Portanto, partículas grandes deveriam possuir maior fluidez e maior poder de aglomeração. No entanto, simultaneamente com a fusão do carvão ocorre também a evolução de voláteis, expandindo a massa fluida e gerando poros. Este fenômeno ocorre mais intensamente com partículas maiores de carvão. Os poros gerados diminuem tanto a densidade quanto a resistência à compressão dos briquetes. Portanto, há um ponto ótimo onde as propriedades de fluidez e

* 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.



inchamento convergem gerando um máximo de resistência mecânica do briquete, no caso deste estudo, foi o produzido com o carvão a 200 mesh.

Das curvas de resistência à compressão, é possível notar que o reflexo da mudança de granulometria do carvão no briquete é muito mais acentuado nos tratados termicamente. A resistência à compressão dos briquetes tratados não podem ser aferidos a partir de sua resistência antes do tratamento e também não podem ser aferidos a partir de suas respectivas densidades.

3.2 Efeito da Quantidade de Carvão Fóssil na Resistência à Compressão e na Densidade dos Briquetes Autorredutores

Para a análise do efeito da quantidade de carvão fóssil na resistência à compressão e na densidade dos briquetes compostos de carvão fóssil e minério de ferro antes e após tratamento térmico foram fixadas as variáveis de processo listadas na Tabela 4.

Tabela 4. Variáveis de processo fixadas para estudo do efeito da quantidade de carvão fóssil nas propriedades dos briquetes autorredutores

Pressão de compactação	536 kgf/cm ²
Granulometria do carvão	<200 mesh
Granulometria do minério de ferro	<0,251 mm (60mesh)
Temperatura de tratamento térmico	500°C
Tempo de tratamento térmico	1 hora

A Figura 2 mostra as curvas de densidade e resistência à compressão em função da quantidade de carvão fóssil no briquete antes e após o tratamento térmico.

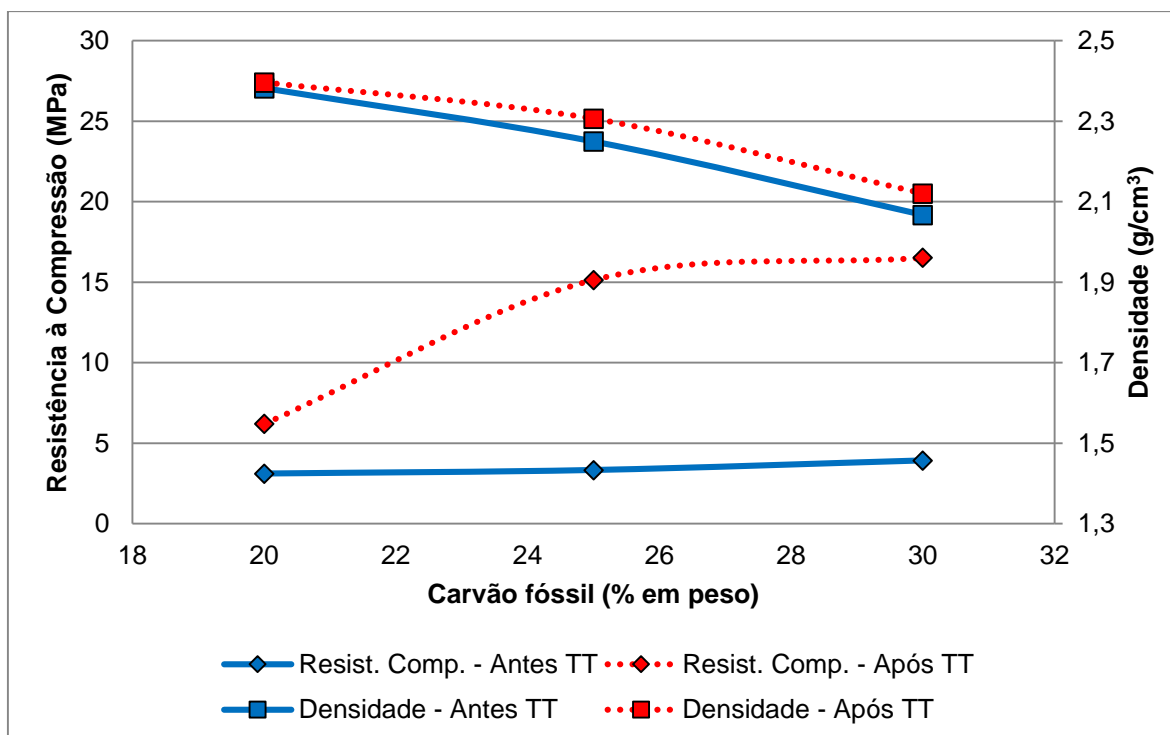


Figura 2. Curvas de resistência à compressão e densidade dos briquetes antes e após o tratamento térmico em função da quantidade de carvão fóssil.

* 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.



Da Figura 2 Figura percebe-se a importância do carvão fóssil como aglomerante a frio dos briquetes. Nota-se que com o aumento da quantidade de carvão na mistura briquetada, aumenta-se a resistência à compressão do briquete. Isso é importante, pois devido a essa propriedade, não é necessária a adição de aglomerantes na mistura. A densidade, como era de se esperar, devido a menor densidade do carvão, diminui com o aumento da quantidade de carvão fóssil no briquete.

Nota-se também que há aumento de resistência à compressão com o aumento da quantidade de carvão fóssil na mistura briquetada e tratada termicamente. Porém, o ganho expressivo de resistência à compressão se dá somente quando a quantidade de carvão salta de 20% para 25%, com um aumento de 144% na resistência. Há uma proporção ideal de carvão e minério, pois a resistência à compressão do briquete depende, como visto anteriormente, da fluidez e do inchamento do carvão. Sabe-se que quanto maior a quantidade de carvão, maior a capacidade de aglomeração e, portanto, maior a resistência mecânica do briquete. Porém, como se pode ver no gráfico, os ganhos com resistência à compressão são muito pequenos para justificar uma adição maior de carvão. Portanto, a quantidade ideal de carvão na mistura briquetada é limitada tanto pela viabilidade econômica (quantidade de carvão maior que a necessária para a redução do minério de ferro), quanto pela viabilidade técnica (o excesso de carvão contribui pouco para o aumento da resistência mecânica). A densidade diminui com o aumento da quantidade de carvão no briquete.

3.3 Efeito da Pressão de Compactação na Resistência à Compressão e na Densidade dos Briquetes Autorredutores

Para a análise do efeito da pressão de compactação na resistência à compressão e na densidade dos briquetes compostos de carvão fóssil e minério de ferro antes e após tratamento térmico, foram fixadas as variáveis de processo listadas na Tabela 5.

Tabela 5. Variáveis de processo fixadas para estudo do efeito da pressão de compactação nas propriedades dos briquetes autorredutores

Carvão fóssil	25% em peso
Minério de ferro (pellet feed)	75% em peso
Granulometria do carvão	<200 mesh
Granulometria do minério de ferro	<0,251 mm (60mesh)
Temperatura de tratamento térmico	500°C
Tempo de tratamento térmico	1 hora

A Figura 3 mostra as curvas de densidade e resistência à compressão em função da pressão de compactação dos briquetes antes e após o tratamento térmico.

* 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.

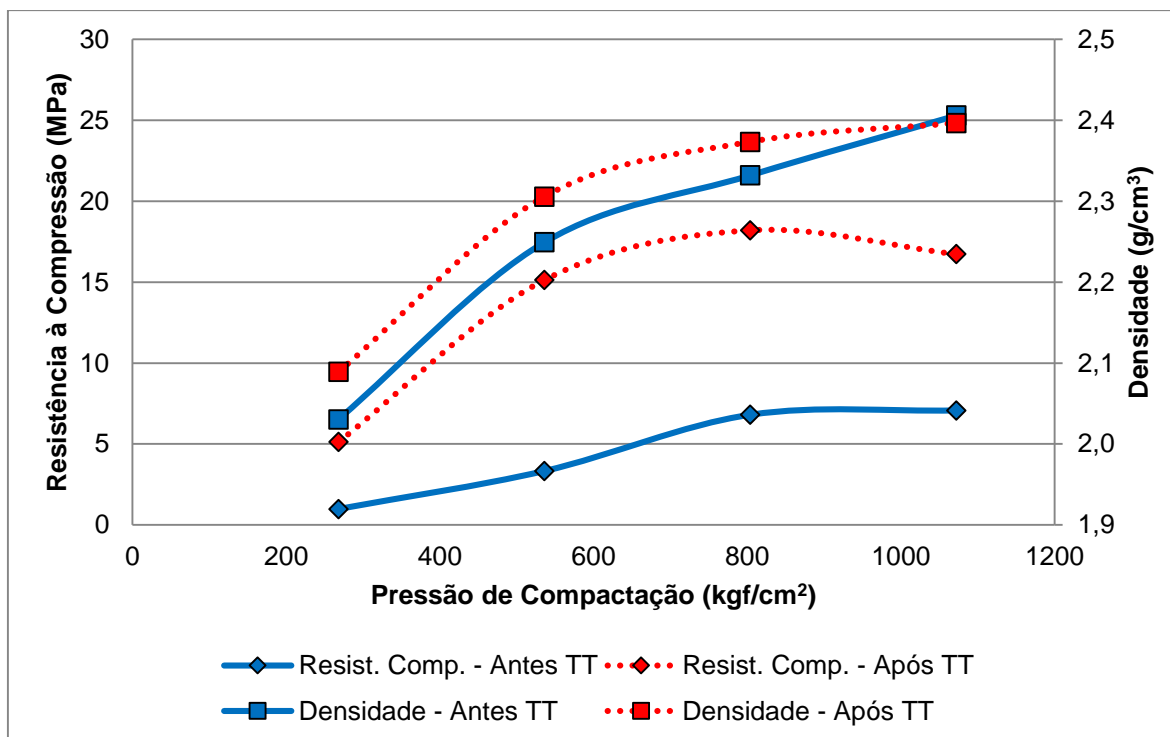


Figura 3. Curvas de resistência à compressão e densidade dos briquetes antes e após o tratamento térmico em função da pressão de compactação.

Da Figura 3, nota-se uma forte influência da pressão de compactação na resistência à compressão dos briquetes antes do tratamento térmico. Porém, essa influência só é notada em pressões abaixo de 804 kgf/cm², onde, a partir desse ponto, a resistência aumenta em uma taxa menor. Em contrapartida, a densidade varia em função da pressão de compactação de forma praticamente linear, mostrando que a variação de densidade, por si só, não explica a resistência à compressão dos briquetes. A explicação para esse desvio é que para altas compressões (no presente caso, 1072 kgf/cm²) ocorrem dois fenômenos deletérios ao briquete, um durante a compactação e outro durante a extração do briquete. Durante a compactação, devido ao método de briquetagem (em matriz cilíndrica), o atrito entre a mistura e a parede da matriz gera um gradiente de compactação, fazendo com que a mistura se compacte de forma desigual, gerando trincas horizontais no briquete. Esse efeito é mais acentuado a altas compressões. Durante a extração do briquete da matriz, a recuperação elástica do briquete quando este sai da cavidade cilíndrica gera trincas que diminuem a sua resistência mecânica. Por isso, mesmo com o aumento de densidade decorrente do aumento da pressão de compactação não há aumento de resistência à compressão.

Nota-se também que o aumento contínuo da pressão de compactação não é sempre benéfico para o briquete após o tratamento térmico, uma vez que há uma inflexão na curva quando a pressão de compactação atinge o valor de 804 kgf/cm², onde a resistência começa a diminuir com a pressão. Essa diminuição de resistência é reflexo das trincas geradas durante a conformação a frio do briquete e que não desaparecem durante o tratamento térmico, já explicada anteriormente. Apesar da resistência à compressão do briquete tratado termicamente diminuir com pressões de compactação maiores que 804 kgf/cm², a densidade continua a aumentar, mostrando que mesmo com o incremento em densidade, consequência da maior pressão de compactação, não há incremento em resistência à compressão.

* 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.



3.4 Efeito da Taxa de Aquecimento do Tratamento Térmico na Resistência à Compressão e na Densidade dos Briquetes Autorredutores

Para a análise do efeito da taxa de aquecimento do tratamento térmico na resistência à compressão e na densidade dos briquetes compostos de carvão fóssil e minério de ferro, foram fixadas as variáveis de processo listadas na Tabela 6 Tabela abaixo.

Tabela 6. Variáveis de processo fixadas para estudo do efeito da taxa de aquecimento do tratamento térmico nas propriedades dos briquetes autorredutores

Carvão fóssil	25% em peso
Minério de ferro (pellet feed)	75% em peso
Granulometria do carvão	<200 mesh
Granulometria do minério de ferro	<0,251 mm (60 mesh)
Pressão de compactação	536 kgf/cm ²
Temperatura de tratamento térmico	500°C
Tempo de tratamento ao atingir 500°C	1 hora

A Figura 4 abaixo mostra um gráfico de barras de densidade e resistência à compressão em função da taxa de aquecimento do tratamento térmico dos briquetes.

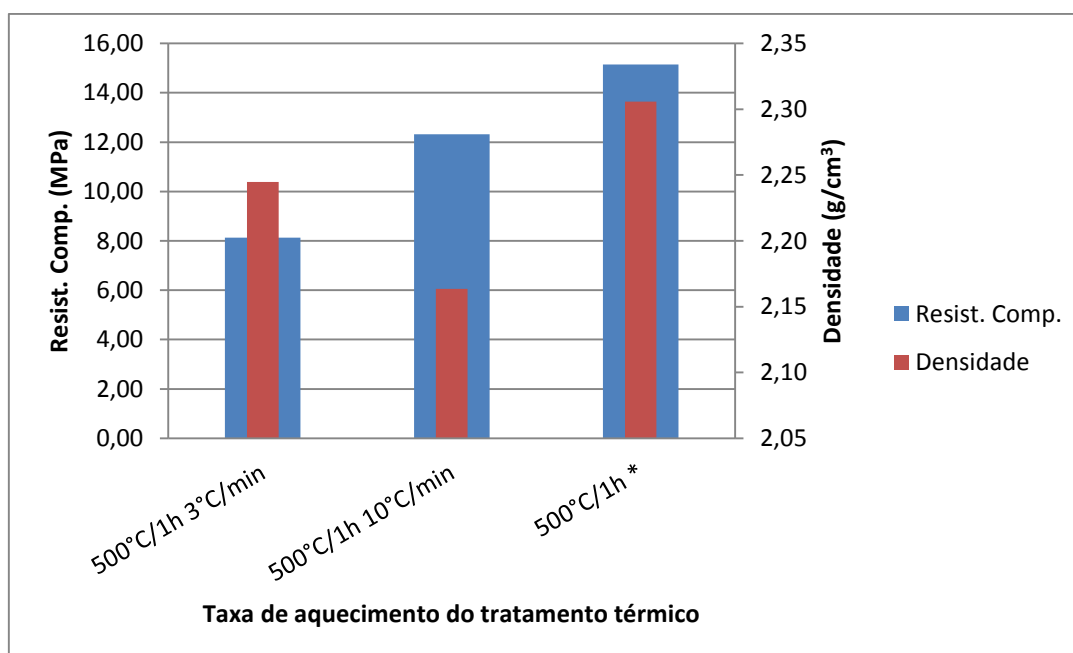


Figura 4. Gráfico de barras de resistência à compressão e densidade em função da taxa de aquecimento do tratamento térmico. * As amostras eram colocadas no forno pré-aquecido a 500°C, sendo impossível a medição da taxa de aquecimento.

Da Figura 4, é possível notar que a resistência à compressão aumenta conforme se aumenta a taxa de aquecimento do tratamento térmico aumenta. Quanto maior a taxa de aquecimento de carvões fósseis coqueificáveis, maior sua fluidez e, portanto, maior a facilidade com que a massa fluida de carvão se difunda pelos inertes, aglomerando-os. Esse fenômeno é evidenciado nesse gráfico pelo aumento da resistência com o aumento da taxa de aquecimento.

* 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.



A densidade em função da taxa de aquecimento do tratamento térmico não segue um padrão, já que era esperado que ao ficar mais tempo sob tratamento térmico, maior seria a perda de massa e, portanto, menor a densidade. Não foram feitos estudos posteriores a esses resultados para a explicação desse fenômeno.

4 CONCLUSÃO

As propriedades de resistência mecânica dos briquetes autorredutores podem ser aferidas por testes de compressão até a ruptura, dando um bom parâmetro para sua avaliação. A densidade por sua vez, nem sempre segue um padrão que pode ser relacionada com a qualidade dos briquetes.

Briquetes autorredutores de minério de ferro e carvão fóssil produzidos por compactação a frio seguida de tratamento térmico têm suas propriedades mecânicas muito dependentes das propriedades do carvão e de como elas se comportam em função das variáveis de processo. Das variáveis estudadas e dos resultados obtidos, pode-se traçar o perfil de um briquete autorredutor com resistência mecânica otimizada. Mas, vale ressaltar que há de se considerar as interações que as variáveis podem ter, o que afetaria as propriedades dos briquetes produzidos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP pelo apoio financeiro, à Vale pelas amostras cedidas e análises e à Lorena da Costa Nascimento, pesquisadora do Centro de Tecnologia de Ferrosos da Vale, pelas discussões e contribuições técnicas.

REFERÊNCIAS

- 1 Mourão MB, Takano C. Self-Reducing Pellets for Ironmaking: Reaction Rate and Processing. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*. 2003; 24: p. 183 - 202.
- 2 Takano C, Mourão MB. Self-Reducing Pellets for Ironmaking: Mechanical Behavior. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*. 2003; 24: 233 - 252.
- 3 Kasai A, Matsui Y, Noma F, Iwakiri F, Shimizu M. Cold strength enhancement mechanism of carbon composite iron ore hot briquet. *Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 2001: p. 313-319.
- 4 Chu M, Nogami H, Yagi Ji. Numerical Analysis on Charging Carbon Composite Agglomerates into Blast Furnace. *ISIJ International*. 2004: 510-517.
- 5 Kojima K. Características de pelotas a frio com carbono e seu efeito no uso em alto-forno. 1983. In: Chu, Mansheng et.al. Numerical Analysis on Charging Carbon Composite Agglomerates into Blast Furnace. *ISIJ International*. 2004: 510-517.
- 6 Kasai A, Matsui Y, Yamagata K. Mechanisms and kinetics of the reactions in the reduction on iron ore and the production of alternative iron sources, 2003. In: Chu, Mansheng. Numerical Analysis on Charging Carbon Composite Agglomerates into Blast Furnace. *ISIJ International*. 2004: p. 510-517.
- 7 Kasai A, Matsui Y, Miyagawa K, Yamagata Y, Naito M, Nakano M. Development of Carbon Composite Iron Ore Hot Briquet and Basic Investigation on its Strength Enhancing Mechanism and Reducibility. *Science and Technology of Innovative Ironmaking for aiming at Energy Half Consumption, Proceedings*. 2003.
- 8 Shimizu M, Nishioka K, Maeda T. Rapid reduction and melting of carbon composite iron ore pellets on high temperature. *Proceedings of Fourth Japan-Brazil symposium on dust processing-energy-environment in metallurgical industries*. 2002.

* 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.



- 9 Chu Ms, Liu Zg, Wang Zc, Yagi Ji. Fundamental Study on Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette Used as Blast Furnace Burden. *Steel Research International*. 2011.
- 10 Matsui Y, Sawayama M, Kasai A, Yamagata Y, Noma F. Reduction Behavior of Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette in Shaft Furnace and Scope on Blast Furnace Performance Reinforcement. *ISIJ International*. 2003: 1904 - 1912.
- 11 Tanaka Y, Ueno T, Okumura K, Hayashi S. Reaction Behavior of Coal Rich Composite Iron Ore Hot Briquettes under Load at High Temperatures until 1400°C. *ISIJ International*. 2011: 1240 - 1246.
- 12 Suzuki H, Mizoguchi H, Hayashi S. Influence of Ore Reducibility on Reaction Behavior of Ore Bed Mixed with Coal Composite Iron Ore Hot Briquettes. *ISIJ International*. 2011: 1255 - 1261.

* *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.*