



COMPORTAMENTO DE CARBONIZAÇÃO DE BRIQUETES DE FERRO-COQUE*

Bruno Deves Flores¹

Adrià Guerrero²

Angeles Gomez Borrego³

Maria Antonia Díez³

Eduardo Osório⁴

Antônio Cezar Faria Vilela⁵

Resumo

A aplicação e viabilidade de uso de aglomerados constituídos de carvão e minério de ferro, denominado Ferro-Coque, vêm recentemente sendo proposta como alternativa inovadora para a redução das emissões de CO₂ e consumo de energia no alto-forno. No presente estudo visou-se investigar o comportamento de carbonização de aglomerados produzidos a partir de 3 diferentes carvões e minério de ferro. Briquetes de carvão/minério foram produzidos em laboratório. Esses briquetes foram submetidos à carbonização em forno laboratorial e em termobalança. As amostras de Ferro-Coque produzidas foram caracterizadas via microscopia ótica e eletrônica. Realizou-se também a caracterização mecânica dos briquetes através de ensaios de compressão e tamboramento. Os experimentos termogravimétricos permitiram uma avaliação detalhada das perdas de massa devido a cada uma das etapas de carbonização. As características morfológicas revelaram diferenças importantes entre os diferentes briquetes testados. A resistência mecânica dos briquetes mostrou uma dependência importante, com a temperatura e tipo de carvão utilizado.

Palavras-chave: Ferro-Coque, carbonização, reatividade de coque.

CARBONIZATION BEHAVIOR IN THE PRODUCTION OF IRON-COKE

Abstract

The application and feasibility of Ferro-Coke agglomerates have recently been proposed as an innovative process to reduce CO₂ emissions and energy consumption in blast furnace. This study aimed to investigate the carbonization behavior of agglomerates produced from 3 different coals and iron ore. For this purpose, coal/iron ore were briquettes in laboratory scale. These briquettes were subjected to carbonization in a laboratorial furnace and also in a thermo analyzer. Iron-coke briquettes produced was then characterized via optical and electron microscopy. Compression strength and drum tests were also carried out. The thermogravimetric experiments permitted a detailed evaluation of the weight loss due to each stage of carbonization. The morphological characteristics revealed significant differences between among coal tested. The mechanical strength of the briquettes showed a significant dependence on temperature and coal type.

Keywords: Ferro-Coke, carbonization, coke reactivity.

¹ *Doutorando do PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.*

² *Doutorando, Pesquisador, Instituto Nacional Del Cárbon (INCAR), Espanha.*

³ *Dr., Pesquisadora, Instituto Nacional Del Cárbon (INCAR), Espanha.*

⁴ *Dr., professor, Laboratório de Siderurgia (LASID), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.*

⁵ *Dr-Ing., professor, Coordenador do Laboratório de Siderurgia (LASID), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 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

Recentemente, o governo e a indústria japonesa vêm investigando a viabilidade de um processo inovador para a produção de aço, o qual visa em âmbito geral reduzir as emissões de CO₂ e o consumo de energia no processo [1-8]. O conceito dessa nova tecnologia está baseado na redução da temperatura de reserva térmica (TRT) dos altos-fornos, a qual é alcançada através do uso de aglomerados contendo coque e ferro, produto denominado Ferro-Coque.

Naito et al. [1] propuseram que o aumento da reatividade do coque é benéfico para a redução da temperatura de reserva térmica do alto-forno. Para esses pesquisadores, uma redução da TRT resulta em um aumento da eficiência de redução na cuba do alto-forno. Através do uso de testes em um simulador de alto-forno, os autores chegaram à conclusão que o uso de coques com alta reatividade pode reduzir a taxa de consumo de agente redutor em aproximadamente 25-35 kg/t de ferro-gusa. No entanto, Babich et al. [9] relataram algumas limitações para a redução da TRT em altos-fornos.

A alta reatividade do coque, necessária para a viabilização da redução da temperatura de reserva térmica, pode ser alcançada através do uso de aditivos como Fe e Ca. Nomura et al. [2] verificou que a adição de Ca em coques (adição em misturas de carvões e diretamente no coque) tem efeito positivo no aumento da reatividade e redução da TRT. Esses resultados foram confirmados em testes industriais, onde se verificou uma redução de 10 kg/t de ferro-gusa, no consumo de agente redutor. Higuchi et al. [3] estudaram a adição de ferro ao coque, produzindo briquetes de Ferro-Coque. Nesse estudo, os autores propuseram que a fabricação de briquetes com 43% de ferro, pode reduzir a TRT em até 180°C, resultando em 6,8% de aumento de eficiência na redução.

Com base no cenário apresentado, esse trabalho visou descrever o processo de produção de aglomerados de carvão e minério de ferro, e as transformações que ocorrem durante a carbonização desse material, culminando na produção de briquetes de Ferro-Coque.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Matérias-Primas para a Elaboração dos Briquetes de Ferro-Coque

A Tabela 1 apresenta as características químicas, reológicas e petrográfica dos carvões utilizados para a fabricação dos briquetes de Ferro-Coque. O carvão QS, de origem australiana é um carvão betuminoso de baixo volátil, tipicamente utilizado para a fabricação de coque, enquanto os carvões MR e ZF são de rank mais baixo, e considerados carvões fracamente coqueificantes. Além dos três carvões minerais, foram elaborados briquetes de Ferro-Coque com a adição de carvão vegetal (CV). O tamanho de partícula dos carvões para a briquetagem foi ajustada em 100% menor que 3 mm.

* *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 1 - Características dos carvões utilizados para a fabricação dos briquetes de Ferro-Coque.

	MV	Cz	Cfixo	C	H	N	S	O	Fmax	Rr	TV	Vit	Ine	Lip
	% bs								ddpm	%	Vol %mmf			
MR	32,7	3,3	64,0	82,52	4,92	1,35	0,57	7,34	8	0,82	68,9	27,5	3,6	
ZF	23,4	7,3	69,3	82,6	4,38	1,31	0,52	3,88	93	1,14	64,5	33,0	2,5	
QS	18,9	11,6	69,5	79,29	4,33	1,89	2,35	0,53	24	1,35	70,6	29,4	0,0	
CV	22,4	4,3	73,4	78,96	2,7	0,64	0,03	13,4	-	-	-	-	-	

A Tabela 2 apresenta a composição química do minério de ferro (pellet feed fines Tubarão) utilizado na fabricação dos briquetes de Ferro-Coque. A granulometria do minério de ferro utilizada foi de 90% menor que 0,150 mm.

Tabela 2 - Características do minério utilizado na fabricação dos briquetes de Ferro-Coque.

Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Mn	P	TiO ₂
%								
67,29	2,64	1,81	0,32	0,02	0,03	0,034	0,029	0,055

2.2 Elaboração das Misturas e o Processo de Briquetagem

A Tabela 3 mostra a composição das misturas elaboradas para a produção dos briquetes de Ferro-Coque. Foram elaboradas 3 diferentes misturas a partir dos carvões minerais MR, ZF e QS. Os briquetes foram confeccionados a partir de 2 kg de misturas, com 58,8% mássico de carvão mineral, 4,5% de carvão vegetal, 27,1% de minério de ferro e 9,6% de ligante. Como ligante utilizou-se uma solução de melação e CaO (1:1), com fator de diluição de 2:1. Os teores de cada um dos constituintes do briquete (ferro total, oxigênio redutível, ganga, matéria volátil, carbono fixo e cinzas dos carvões) foram calculados de acordo com as com os percentuais mássicos dos carvões e minério de ferro, e das composições químicas dessas matérias-primas (Tabelas 1 e 2).

Tabela 3 - Composição dos briquetes de Ferro-Coque.

Briquetes	Minério de Ferro			Carvão (Mineral + Vegetal)			Ligante		
	Fe _T	O _{red.}	Ganga	MV	C _{fixo}	Cz	CaO	Melaço	H ₂ O
BMR	18,3	7,5	1,3	20,2	40,9	2,1	2,4	2,4	4,8
BZF	18,3	7,5	1,3	14,8	44,1	4,5	2,4	2,4	4,8
BQS	18,3	7,5	1,3	12,1	44,2	7,0	2,4	2,4	4,8
	27,1%			63,3%			9,6%		

Para a fabricação dos briquetes utilizou-se uma briquetadeira de rolos laboratorial (Komarek, modelo B050), conforme mostra a Figura 1. Inicialmente as misturas foram colocadas na tremonha de alimentação, e misturadas por um período de 20 minutos em temperatura ambiente. A distância entre rolos foi fixada em 1,5 mm e a força nos rolos foi de 35 kN. Os briquetes produzidos têm formato de traveseiro, com dimensões de 40 mm de comprimento, 20 mm de largura e 15 mm de espessura. Após a briquetagem foi realizada a etapa de cura dos briquetes em estufa, durante 24 horas a 35°C.

* 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.

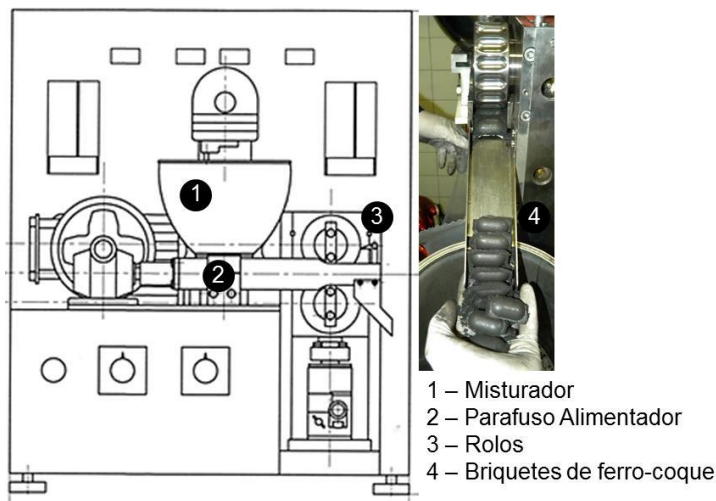


Figura 1 - Briquetadeira utilizada para a fabricação dos briquetes de Ferro-Coque.

2.3 Carbonização dos Briquetes de Ferro-Coque

2.3.1 Carbonização em forno laboratorial

O processo de carbonização dos briquetes foi realizado utilizando-se uma retorta metálica inserida em um forno elétrico laboratorial, conforme mostra a Figura 2. Os testes foram realizados com uma carga de 20 briquetes (aproximadamente 150 g), os quais foram acondicionados na retorta metálica e introduzidos no forno pré-aquecido a uma temperatura de 250°C. O aquecimento da carga de briquetes foi realizado em atmosfera inerte, com fluxo de 1L min⁻¹ de N₂, e com taxa de aquecimento de 4°C min⁻¹, até atingir a temperatura final de teste estabelecida. Foram avaliadas 3 temperaturas finais de carbonização: 400 (etapa pré-plástica), 600 (semi-coque) e 1000°C (coque). A carga de briquetes foi mantida na temperatura final de teste por um período de 30 minutos. O resfriamento dos briquetes foi feito retirando-se a retorta do forno imediatamente após o teste, e mantendo-se a atmosfera inerte de nitrogênio até as amostras atingirem temperatura ambiente.

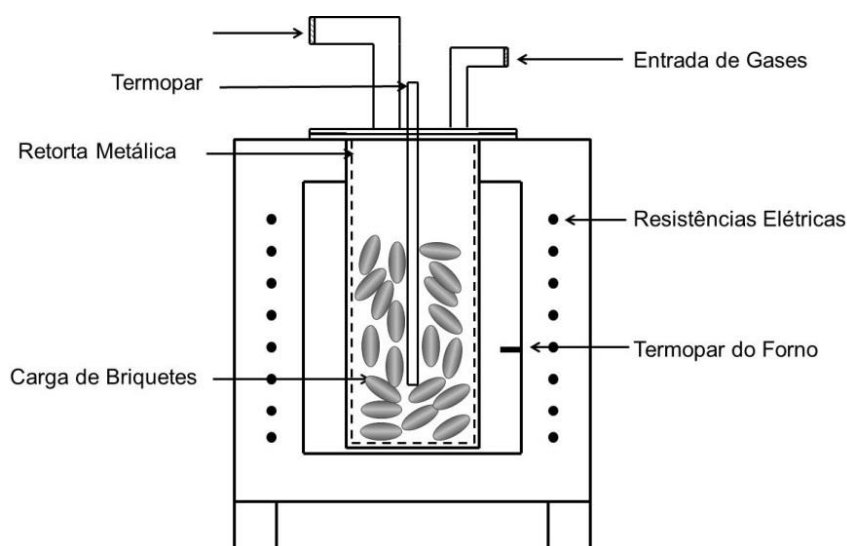


Figura 2 - Aparato experimental para a carbonização dos briquetes de Ferro-Coque em forno elétrico de laboratório.

* *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.*



2.3.2 Carbonização em Termobalança

Para conhecer o comportamento dos briquetes durante os ensaios de carbonização, foi realizado também o aquecimento em termobalança de um fragmento de briquete (Figura 3). As amostras utilizadas nesse ensaio foram cuidadosamente produzidas a partir do corte de uma seção dos briquetes, com massa de 1 g e com dimensões conforme mostra a Figura 3. O aquecimento das amostras foi feito a partir da temperatura ambiente até 1000°C, com taxa de aquecimento de 4°C min⁻¹, e com fluxo de 100 mL min⁻¹ de N₂. Essa etapa foi seguida por um período isotérmico de 30 minutos na temperatura de 1000°C, mantendo-se a atmosfera de nitrogênio.

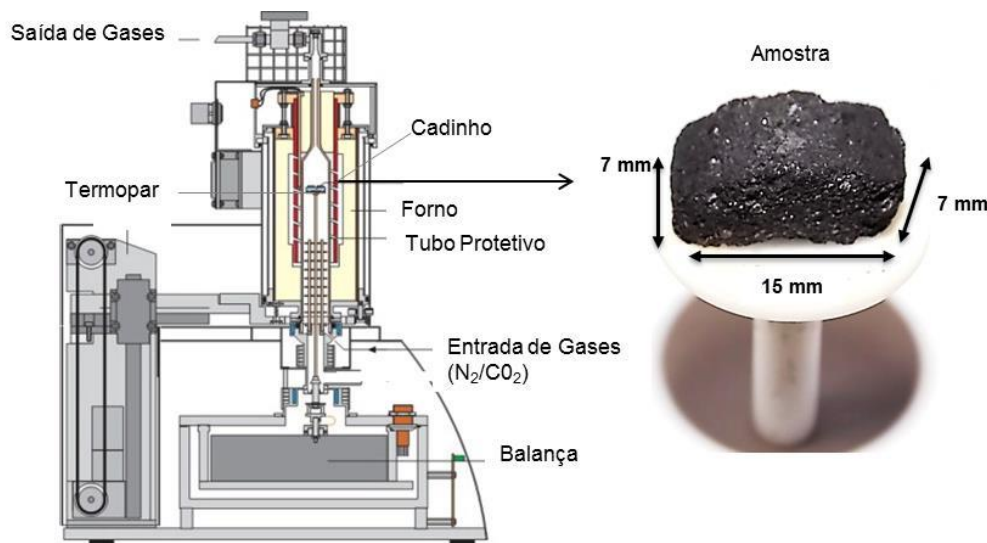


Figura 3 - Termobalança e amostra de briquete utilizada em ensaio de carbonização.

2.4 Avaliação dos Briquetes de Ferro-Coque

2.4.1 Análise morfológica

A morfologia de amostras de briquetes, antes e após a carbonização, foi avaliada via microscopia ótica e eletrônica. As amostras analisadas em microscópio ótico foram previamente embutidas em resina e observadas com objetivas de imersão em água e óleo, com magnificações de 200 e 500X. Realizaram-se análises petrográficas por contagem, conforme descrito em Flores [10]. As análises de microscopia eletrônica de varredura foram realizadas em microscópio da marca Tescan, modelo Vega 3 SB.

2.4.2 Testes de resistência mecânica

Os briquetes de Ferro-Coque antes e após a carbonização foram submetidos a testes de compressão em uma máquina de ensaios universal Shimadzu Autograph AG-X 50 kN. Os testes foram conduzidos utilizando-se 20 N de pré-carga e velocidade constante de 0,1 mm min⁻¹. A resistência a compressão dos briquetes antes e após carbonização foi determinada a partir do valor médio de 4 repetições do ensaio de compressão de cada amostra.

Foram realizados também ensaios de resistência mecânica em tambor Tipo-I. O tambor utilizado tem 130 mm de diâmetro e 700 mm de comprimento, mesmo equipamento utilizado nos testes de resistência após a reação do coque (CSR). Para os testes de tambor utilizou-se uma carga de 10 briquetes (antes e após a carbonização em 1000°C), os quais foram submetidos entre 100 e 600 revoluções,

* 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.



com velocidade de 20 rpm. A cada 100 rotações, o material peneirado e classificado em uma peneira de 10 mm. O índice I10 foi determinado pela relação entre a massa retida e a massa inicial da carga de briquetes.

3 RESULTADOS

3.1 Perfil de Carbonização dos Briquetes de Ferro-Coque

As Figuras 4 e 5 mostram as curvas de perda massa e taxa de perda de massa dos briquetes durante a carbonização em termobalança. Observa-se que os perfis das curvas de perda de massa, obtidas para as 3 diferentes amostras estudadas, apresentaram semelhanças. Inicialmente, com o aumento da temperatura até 100°C (curva pontilhada), ocorreu a perda de massa dos briquetes que está associada à saída da umidade do material. Uma segunda perda de massa teve início em temperaturas próximas a 130°C, atingindo taxa máxima de perda (Figura 5) em 220°C. A perda de massa registrada durante esse período está muito provavelmente associada à decomposição térmica do melão [11].

Os briquetes tiveram uma acentuada perda de massa, com elevadas taxas no intervalo entre 340 °C e 600°C (Figuras 5 e 6). Geralmente, a perda da matéria volátil dos carvões metalúrgicos durante a coqueificação, ocorre em temperaturas entre 350 e 550°C, acompanha da transformação plástica dos carvões. Nota-se que o início das perdas por desvolatilização em cada um dos briquetes iniciou e atingiu uma taxa máxima em temperaturas ligeiramente diferentes. O briquete BMR, produzido com o carvão de mais baixo rank (Rr TV = 0,82%) , iniciou essa perda em temperatura ligeiramente menor que as demais amostras, seguido pela amostra BZF e BQS (Rr TV = 1,14% e 1,35%, respectivamente). Essa observação condiz com o esperado para o comportamento de desvolatilização em função de tempo e rank. Além disso, observou-se uma coerência entre os percentuais de perda de massa dos briquetes nessa etapa e o percentual de matéria volátil calculada para cada uma das amostras (Tabela 3).

Após o período de desvolatilização primária dos carvões, as taxas de perda de massa dos briquetes se mantiveram relativamente estáveis até atingir temperaturas próximas a 650°C (Figura 5). A partir dessa temperatura, verificou-se um aumento da taxa de perda de massa, com picos máximos em temperaturas próximas a 730°C. A perda de massa durante esse intervalo de temperaturas está muito provavelmente associada ao aumento da pressão parcial de CO no interior dos briquetes, gerando assim condições para que ocorra a redução dos óxidos hematita e magnetita até wustita, com consumo de carbono. Através de um balanço de massa é possível verificar que a perda durante esse intervalo é condizente com essa hipótese. Além disso, para temperaturas acima de 600°C o semicoque gerado pela transformação dos carvões, pode perder pequenas quantidades de massa por desvolatilização, com desprendimento principalmente de hidrogênio. Esse hidrogênio pode também atuar como redutor dos óxidos presentes.

Com o progressivo aumento da temperatura de carbonização as condições para a formação de CO no interior dos briquetes devem aumentar, e a redução da wustita em ferro metálico se torna possível. Logo, a perda de massa verificada para todos os briquetes em temperaturas acima de 800°C é muito provavelmente resultado dessa reação (Figura 5). Durante essa etapa, verificaram-se diferenças importantes entre as amostras. Os briquetes produzidos com os carvões de menor rank resultaram em taxas mais elevadas de perda de massa. Isso indica uma maior

* 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.



reatividade desses carvões, o que provavelmente resulte em uma maior cinética da reação de Boudouard.

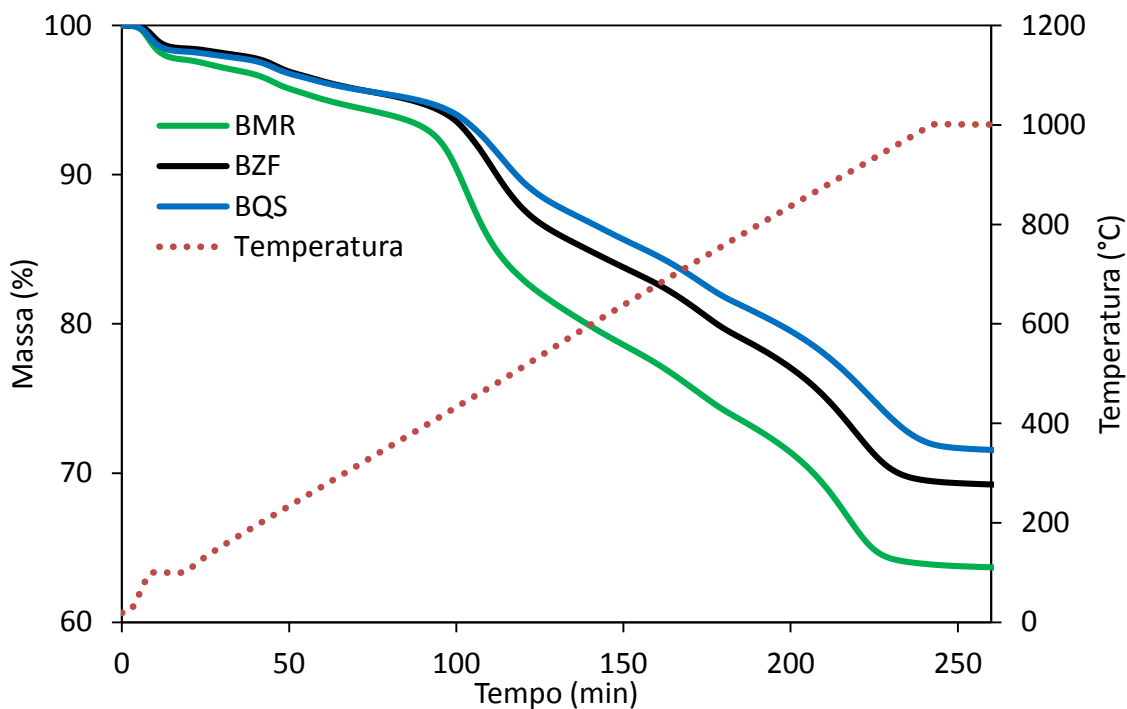


Figura 4 - Perda de massa durante a carbonização dos briquetes em termobalança.

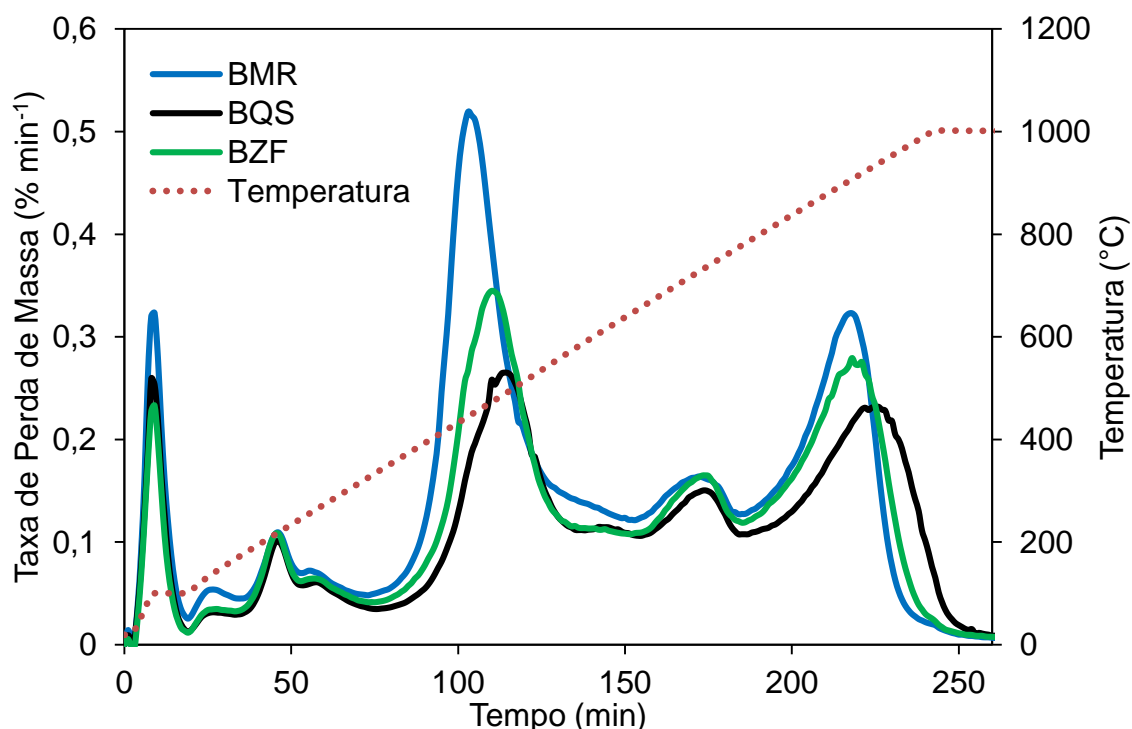


Figura 5 - Taxa de perda de massa durante a carbonização dos briquetes em termobalança.

* 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.



3.2 Aspectos Morfológicos dos Briquetes de Ferro-Coque

As Figuras 6a e b apresentam a aparência externa e interna, de um briquete antes e após a carbonização em forno laboratorial na 1000°C. Os briquetes não carbonizados (Figura 6a) apresentaram pequenas trincas ao longo de sua região central, indicando uma falta de aglomeração durante o processo de briquetagem. Essas pequenas trincas foram observadas também nos briquetes carbonizados nas temperaturas de 400, 600 e 1000°C. Os briquetes carbonizados nas temperaturas de 600 e 1000°C (Figura 6b, T=1000°C), apresentaram aspecto semelhante, com estrutura mais coesa do que os demais briquetes. O grau de coesão dos briquetes foi melhor para as amostras produzidas com carvões de mais alta fluidez.

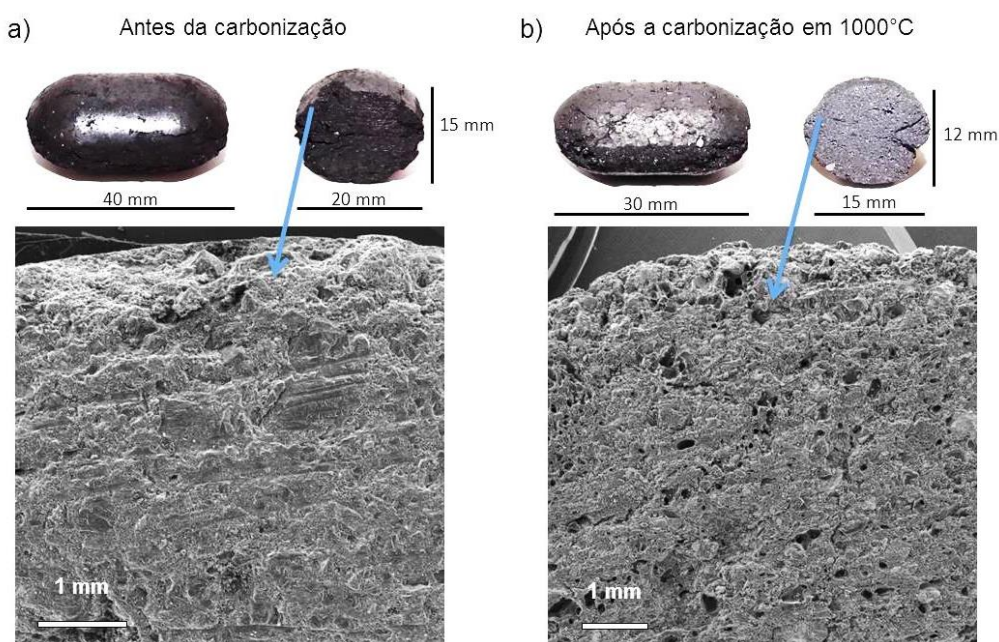


Figura 6 - Aparência externa e interna dos briquetes a) antes e b) após a carbonização em temperatura de 1000°C.

As Figuras 7a-f mostram as micrografias dos três briquetes não carbonizados e dos briquetes após a carbonização em temperatura de 1000°C. Nos briquetes não carbonizados (Figuras 7a, c, e) as partículas de minério de ferro são facilmente reconhecidas, e se diferenciam dos carvões devido a sua alta reflectância. De modo geral, observou-se uma homogeneidade na distribuição entre as partículas de minério de ferro e as de carvão, com um nível de interação semelhante para todos os briquetes não carbonizados.

Após a coqueificação percebeu-se um aumento da coesão da matriz dos briquetes (Figuras 7b, d, f), onde muitas partículas de carvão estão aglomeradas umas as outras, retendo ou não o ferro formado em seu interior. Isso pode ser exemplificado, na Figura 8, na qual é mostrado em detalhe a matriz de coque e as partículas de ferro formado na amostra. Na micrografia de menor aumento é possível verificar tanto partículas sem adesão a matriz, como partículas bem integradas (micrografias de maior aumento). Após a carbonização, observou-se também um aumento da porosidade das amostras, isso ocorre devido à formação de poros no coque, a qual é resultado da desvolatilização durante o aquecimento dos carvões, principalmente da faixa de temperaturas entre 340 e 600°C, conforme discutido anteriormente.

* 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.

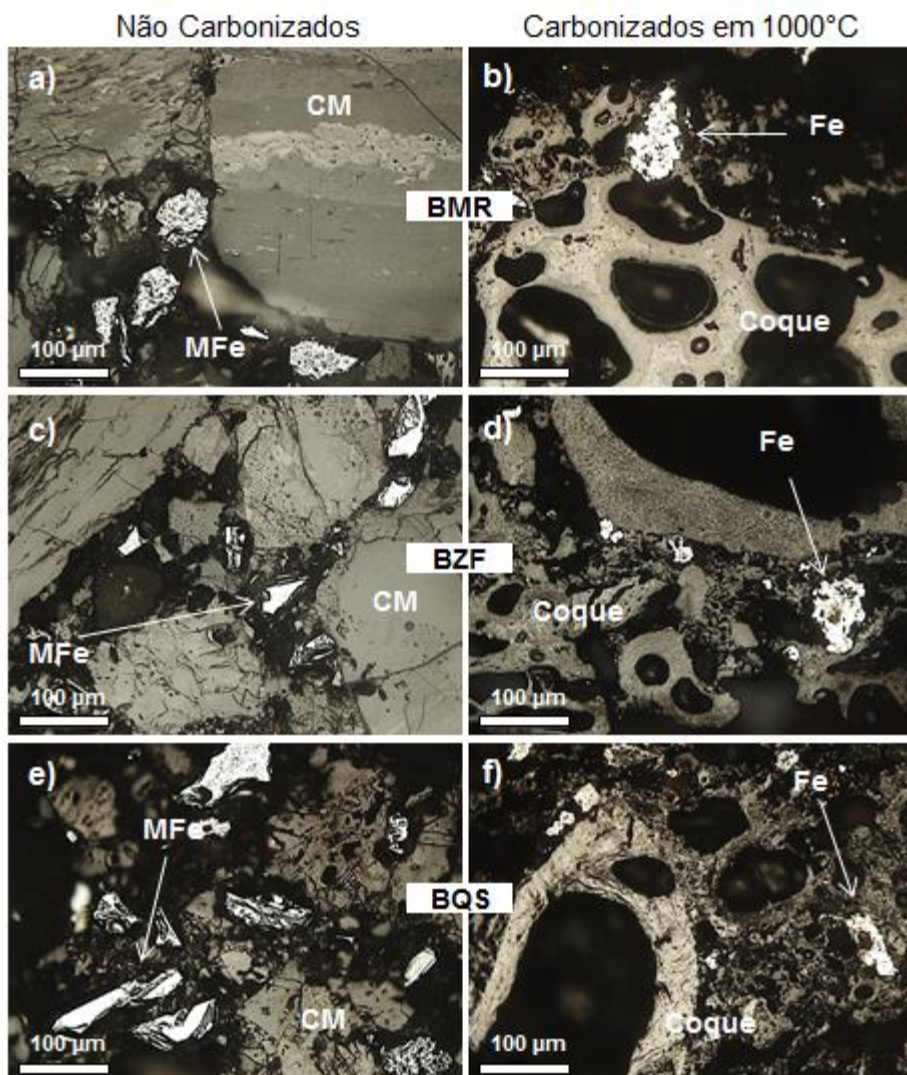


Figura 7 - Micrografias obtidas em microscópio óptico antes e após a carbonização dos briquetes. a) BMR; b) BMR-1000; c) BZF; d) BZF-1000; e) BQS; f) BQS-1000.

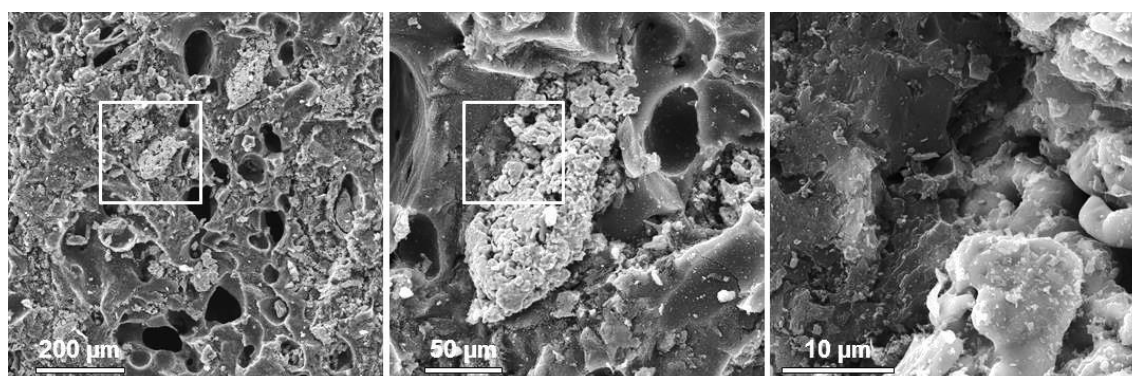


Figura 8 - Micrografias obtidas em MEV para a amostra BZF-1000°C, mostrando a interação do ferro formado e da matriz de coque após a carbonização.

O coque observado nos briquetes e formado a partir de cada um dos 3 diferentes carvões (MR, ZF e QS), apresentou diferenças importantes em relação a sua anisotropia quando observados em luz polarizada. Essas diferenças foram quantificadas por contagem, conforme mostra a Tabela 4Tabela . A matriz do coque formado a partir da carbonização da amostra BMR (Figura 7b), é essencialmente

* 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.



isotrópica. Já a matriz do coque gerado a partir do carvão ZF (Figura 7Figura d), é dominada por texturas isotrópicas e circulares. As partículas de coque, encontradas no briquete produzido com o carvão de maior rank (BQS), apresentou a mais larga variação de domínios anisotrópicos, com cerca de 17% de domínios grandes (lenticular e bandas, Figura 7f). O grau de anisotropia da matriz de coques pode ser relacionado a propriedades como resistência mecânica e reatividade [10]. Geralmente, quanto maiores são os domínios anisotrópicos, menor a resistência e reatividade do coque.

Tabela 4 - Análise petrográfica dos briquetes de Ferro-Coque produzidos a 1000°C

		BMR-1000	BZF-1000	BQS-1000
MATRIZ	Unid.	69,0	53,3	40,4
Isotrópico		68,0	24,2	9,4
Circular	% vol.	1,0	27,5	13,6
Lenticular		0,0	1,6	7,2
Bandas		0,0	0,0	10,2
Inclusões		10,0	27,9	32,2
Inertes Orgânicos		4,6	23,0	19,4
Carvão Vegetal	% vol.	4,8	3,4	9,0
Outros		0,6	1,6	3,8
Matéria Mineral (carvão)	% vol.	1,6	0,6	1,4
Ferro		19,4	18,2	26,0

3.3 Resistência Mecânica dos Briquetes de Ferro-Coque

A Figura 9 apresenta os resultados dos ensaios de compressão realizados com os briquetes antes e após a carbonização nas diferentes temperaturas testadas. A ruptura dos briquetes não carbonizados e carbonizados na temperatura de 400°C foi muito semelhante para todas as amostras, com valores variando entre 167 e 201N. Esse resultado indica que mesmo com a decomposição térmica do ligante orgânico, em temperaturas entre 130 e 220°C (vide item 3.1), os briquetes mantiveram sua integridade física. Claramente a carbonização dos briquetes na temperatura de 600°C, elevou a resistência de todas as amostras. O aumento da resistência dos briquetes com o aumento da temperatura de carbonização é resultado da transformação plástica dos carvões. Observou-se que essa elevação se deu de forma mais importante para os briquetes produzidos a partir de carvões minerais com valores mais altos de fluidez máxima (Tabela 1Tabela), onde BZF foi amostra com maior resistência à compressão nessa temperatura. O aumento adicional na temperatura de carbonização elevou ainda mais a resistência dos briquetes. No entanto, isso não foi percebido para a amostra BZF. Conforme relatado anteriormente, nessa faixa de temperatura, os carvões coqueificáveis passam por uma desvolatilização secundária, bem como por aumento da organização estrutural do coque formado, o que poderia justificar o aumento adicional de resistência.

* *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.*

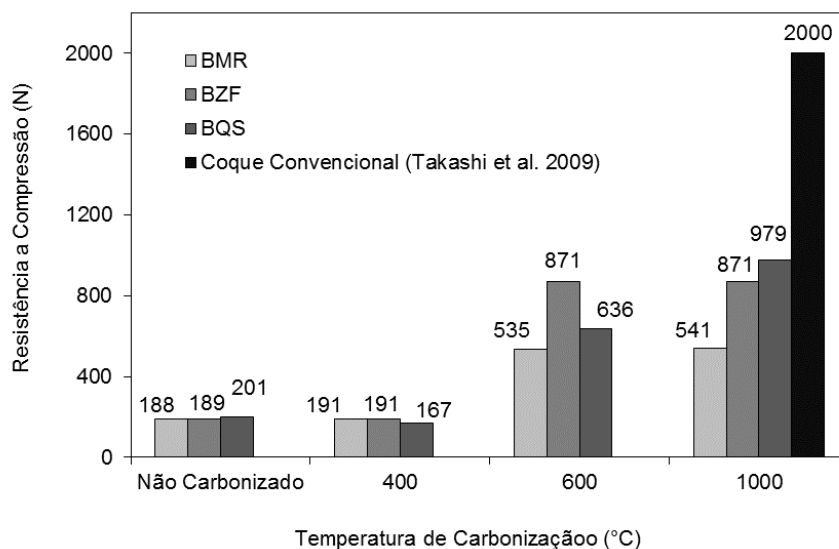


Figura 9 - Resistência à compressão dos briquetes de Ferro-Coque.

A Figura 10 mostra os ensaios de tamboramento realizados com os briquetes não carbonizados e carbonização em 1000°C. A resistência dos briquetes não carbonizados foi semelhante para todas as amostras ao longo do ensaio de tamboramento. O $I_{10_{600}}$ obtido ao término do ensaio foi de aproximadamente 30% para todas essas amostras. Já para os briquetes carbonizados, a resistência foi dependente do tipo do carvão utilizado. Os briquetes produzidos com o carvão ZF ($I_{10_{600}} = 53\%$) tiveram melhor desempenho, seguido por QS ($I_{10_{600}} = 46\%$) e MR ($I_{10_{600}} = 36\%$). A melhor performance dos briquetes produzidos com o carvão ZF é muito provavelmente resultado de sua fluidez máxima mais elevada em relação aos demais, com conseqüente melhor aglutinação.

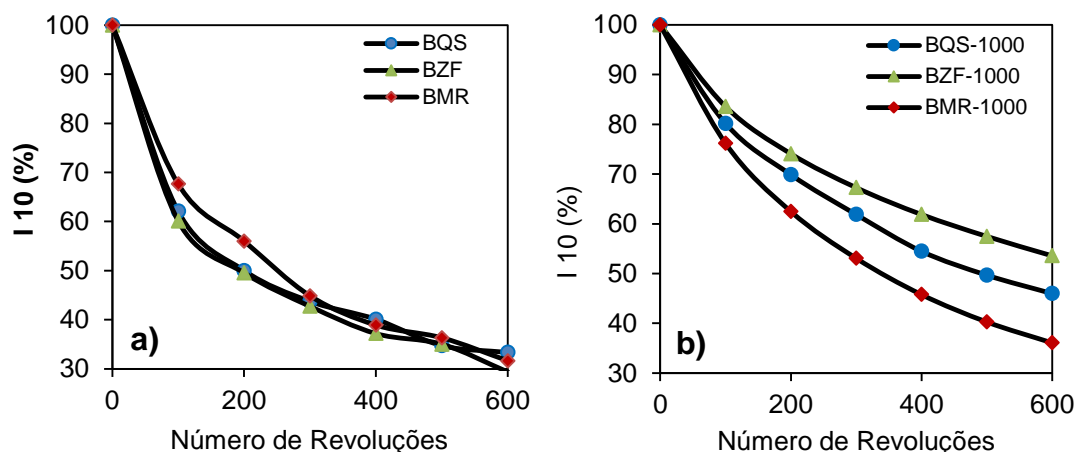


Figura 10 - Resistência ao tamboramento dos briquetes de Ferro-Coque. a) não carbonizados; b) carbonizados em 1000°C.

4 CONCLUSÕES

A partir da produção e caracterização dos briquetes de Ferro-Coque, chegou-se às seguintes conclusões:

- Os experimentos termogravimétricos permitiram uma avaliação detalhada das perdas de massa devido a cada uma das etapas de carbonização;

* 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 características morfológicas revelaram diferenças importantes entre os diferentes briquetes testados. O grau de coesão dos briquetes foi melhor para as amostras produzidas com carvões de mais alta fluidez;

- O coque observado nos briquetes e formado a partir de cada um dos 3 diferentes carvões estudados (MR, ZF e QS), apresentou diferenças importantes com respeito a anisotropia;

A resistência mecânica dos briquetes mostrou uma dependência importante, com a temperatura e tipo de carvão utilizado. De modo geral, a resistência dos briquetes de Ferro-Coque foi mais alta para amostras produzidas com carvões de mais alta fluidez.

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo apoio financeiro e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

REFERÊNCIAS

- 1 Naito M, Okamoto A, Kazuyoshi Yamaguchi K, Yamaguchi T Inoue Y. Improvement of blast furnace reaction efficiency by temperature control of thermal reserve zone. Nippon Steel Technical Report, Junho 2006, No. 94.
- 2 Nomura S, Naito S, Yamaguchi K. Post-reaction Strength of Catalyst-added Highly Reactive Coke. ISIJ International, 2007, Vol. 47, No. 6, 831–839.
- 3 Higuchi K, Nomura S, Kunitomo K, Yokoyama H, Naito M. Enhancement of Low-temperature Gasification and Reduction by Using Iron-coke in Laboratory Scale Tests. ISIJ International, 2011, Vol. 51, No. 8, 1308–1315.
- 4 Takashi A, Kiyoshi F, Hidekazu F. Development of carbon iron composite process. JFE Technical Report, Maio 2009, No. 13.
- 5 The Technical Society, The Iron and Steel Institute of Japan. Production and Technology of Iron and Steel in Japan during 2012. ISIJ International, 2013, Vol. 53, No. 6, 927–934.
- 6 Tanaka Y, Ueno T, Okumura K, Hayashi S. Reaction Behavior of Coal Rich Composite Iron Ore Hot Briquettes under Load at High Temperatures until 1 400°C. ISIJ International, 2011, 51(8): 1240–1246.
- 7 Takeda K, Hideaki Sato H, Anyashiki T, Sato T, Fujimoto H, Sumi H, Watanabe A, Sato M, Higuchi K, Hamaguchi M, Ujisawa Y. Pilot Plant Scale Development Of An Innovative Ironmaking Process For Usage Of Low Graded Raw Materials And CO2 Mitigation. The 6th International Congress on the Science and Technology of Iron Making – ICSTI, 2012, Rio de Janeiro. 710-721.
- 8 Uchida A, Kanai T, Yamazaki Y, Hiraki H, Saito Y, Aoki H, Komatsu N, Okuyama N, Hamaguchi M. Quantitative Evaluation of Effect of Hyper-coal on Ferro-coke Strength Index. ISIJ International, 2013, 53 (3): 403–410.
- 9 Babich A, Senk D, Gudenau. Effect of coke reactivity and nut coke on blastfurnace operation. Ironmaking Steelmaking, 2009; 36:222–9.
- 10 Flores BD. Avaliação Experimental Em Forno Piloto Da Influência De Um Carvão Colombiano De Alta Heterogeneidade E De Carvões De Alto E Baixo Volátil Na Qualidade Do Coque. [Dissertação de Mestrado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2014.
- 11 Olbrich H. The Molasses. Fermentation Technologist, Institut für Zuckerindustrie, Berlin (Germany), 1963.

* 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.