

BRIQUETES AUTORREDUTORES A PARTIR DE CAREPAS DE PROCESSAMENTO SIDERÚRGICO PARA UTILIZAÇÃO EM FORNOS ELÉTRICOS A ARCO*

Pedro Jorge Walburga Keglevich de Buzin¹

Bruno Deves Flores²

Nestor Cezar Heck³

Antônio Cezar Faria Vilela⁴

Resumo

A produção siderúrgica em usinas semi-integradas gera vários tipos de resíduos dentre os quais as carepas. No presente trabalho estuda-se o comportamento físico-químico em altas temperaturas de briquetes autorredutores elaborados com carepa e finos de carvão vegetal produzidos no Rio Grande do Sul, objetivando sua introdução no processo produtivo de aciaria elétrica. Ensaios realizados em laboratório com briquetes industriais confeccionados com estes resíduos demonstraram a potencialidade de utilização destes briquetes autorredutores em processos siderúrgicos via forno elétrico a arco (FEA).

Palavras-chave: Carepa; Finos carvão vegetal; Briquetes autorredutores.

SELF-REDUCING BRIQUETTES FROM STEELMAKING MILL SCALE FOR USE IN ELECTRIC ARC FURNACE

Abstract

The steelmaking industry in semi-integrated plants generates several wastes, among which mill scale. In this paper it was studied self-reducing briquettes made with mill scale and charcoal fines produced in Rio Grande do Sul State and its physicochemical behavior at high temperatures. The objective is its reintroduction in electric steelmaking process. Laboratory tests with industrial briquettes made with these residues had demonstrated the potential use of these briquettes in steelmaking processes through electric arc furnace (EAF).

Keywords: Charcoal fines; Self-reducing briquettes.

¹ Eng.º. Quim., M.sC, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Eng. de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGE3M; LEAmet; UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Eng.º. Metal., M.sC, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Eng. de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGE3M; LaSid; UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Dr.-Ing, professor, Núcleo de Termodinâmica Computacional para a Metalurgia, NTCm; Depto. de Metalurgia, PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁴ Dr.-Ing., professor, Laboratório de Siderurgia, LASID; Depto. de Metalurgia, PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Em anos recentes, o incremento da produção siderúrgica das usinas semi-integradas levou a um aumento proporcional na geração dos resíduos decorrentes desta atividade. Este segmento da siderurgia é tipicamente reciclador e a principal matéria-prima utilizada são sucatas ferrosas e o forno elétrico a arco - FEA -, é o equipamento de fusão utilizado pela maior parte destas usinas. Dentre os resíduos tem-se a carepa, originada pela oxidação da superfície do aço quando aquecido em alta temperatura, sob ar atmosférico. Este resíduo é gerado em sua maior parte durante as etapas de lingotamento e laminação do aço. Outras atividades, como a trefilação, forjaria e usinagem também originam carepa. Estima-se que a geração de carepa em usinas siderúrgicas seja de 1 a 2% da produção de aço [1]. No Brasil são geradas cerca de 300 mil toneladas desse resíduo por ano, enquanto em nível mundial esse valor chega a 7 milhões de toneladas [2].

Fatores como o custo da destinação adequada dos resíduos siderúrgicos, além da implementação de práticas de produção mais limpa, tem incentivado a pesquisa de novas alternativas de recuperação ou aproveitamento de resíduos gerados na produção do aço. As carepas são basicamente constituídas de óxidos de ferro, despertando o interesse em sua reciclagem tendo em vista o seu alto teor de ferro, que corresponde aproximadamente a 70% do resíduo [3].

Uma alternativa possível para destinação deste resíduo é buscar a viabilidade de sua reintrodução no próprio processo de fabricação do aço. Em termos conceituais, isto pode ser obtido através de redução dos óxidos de ferro da carepa com auxílio de um agente redutor adequado e o aporte de energia necessário. Em usinas integradas, a reintrodução da carepa no processo de produção tem maiores possibilidades, uma vez que essas planta possuem unidades de redução, ou ainda convertedores à oxigênio. Um exemplo é a utilização de briquetes de carepa, que atuam como refrigerantes da carga nos convertedores [4,5], ou ainda, incorporando-a ao sinter, para uso no alto-forno [6]. No entanto, em usinas semi-integradas, onde em geral não há equipamento específico para redução, a reciclagem da carepa no processo produtivo da usina torna-se um grande desafio. Isto se deve não só à dinâmica de funcionamento do FEA como ao ciclo de produção deste equipamento.

Em anos recentes, pesquisadores [7-9] tem proposto a reciclagem da carepa através de briquetes autorredutores como parte da carga do FEA. A denominação autorredutor, nesse contexto, refere-se a uma mistura entre os óxidos de ferro que constituem a carepa e um redutor à base de carbono. A briquetagem é geralmente utilizada na fabricação destes aglomerados como forma de garantir o íntimo contato entre os óxidos de ferro e o agente redutor. Para manter a coesão dos componentes do briquete, é também adicionado um ligante adequado. A autorredução é uma tecnologia que já vem sendo estudada de longa data por vários pesquisadores [5,7-12], tanto para o desenvolvimento de novos processos siderúrgicos [13] quanto para a reciclagem de diversos resíduos siderúrgicos. Embora se tenha um conhecimento bem fundamentado a respeito da autorredução, a introdução de aglomerados autorredutores em FEA ainda é um tema pouco explorado.

A autorredução é dependente do estabelecimento e manutenção de condições termodinâmicas adequadas para que possa ocorrer a redução dos óxidos de ferro. Isto ocorre em razão da elevada pressão parcial dos gases redutores formados no interior do briquete. Além disso, a técnica de briquetagem permite a produção de aglomerados com alta resistência, que é fundamental para o manuseio e para as etapas de carregamento e aquecimento nos reatores siderúrgicos.

A qualidade dos briquetes autorredutores, traduzida durante o processo produtivo como eficiência de redução dos óxidos metálicos, é influenciada por uma série de características, tais como, granulometria das matérias-primas, tipo de agente redutor e ligante, porosidade, tamanho e forma dos briquetes, etc. Dentre os agentes redutores carbotérmicos disponíveis, o carvão vegetal, pela sua maior reatividade ao CO_2 , pode apresentar vantagens na cinética de redução dos briquetes, quando comparado a outras fontes carbonosas [14].

Com essas premissas, neste trabalho é feita uma avaliação em laboratório do comportamento sob aquecimento em alta temperatura de briquetes autorredutores, cujos componentes principais são carepas e carvão vegetal. Com a intenção de efetuar o aproveitamento de resíduos, considerando fontes de carbono renováveis, finos de carvão vegetal originários do processamento deste produto são utilizados como agentes de redução neste trabalho. Baseado em pesquisa anterior [7], verificou-se que este resíduo é gerado no Estado do Rio Grande do Sul em quantidades significativas, possuindo baixo valor econômico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A confecção dos briquetes para este estudo baseou-se na caracterização dos principais constituintes, seguindo de cálculo das proporções e briquetagem em equipamento industrial. Esses briquetes foram submetidos a testes isotérmicos de autorredução e testes de redução seguido por fusão.

2.1 Matérias-Primas dos Briquetes Autorredutores

Foram utilizadas como matérias-primas principais: carepa proveniente de uma usina siderúrgica semi-integrada e como agente de redução carbotérmica finos de carvão vegetal originários do estado do Rio Grande do Sul [15]. Foram ainda utilizados como agentes ligantes melação e cal na confecção dos briquetes autorredutores.

2.1.1 Carepa

A caracterização da carepa utilizada nesse estudo já foi detalhada em estudos anteriores [7,8], por isso será brevemente apresentada nesse trabalho. A Tabela 1 apresenta a análise elementar da carepa, verificando-se que o elemento majoritário é o ferro. Percebe-se ainda a presença de pequenas quantidades de outros metais, os quais assume-se que estejam presentes na carepa na forma de seus óxidos mais estáveis.

Tabela 1. Caracterização química da carepa por via úmida e ICP

Elementos (% em massa)	Al	Cr	Fe	Mn	Ni	Si	W
	1,95	0,32	70,2	0,65	0,1	0,05	0,83

A Tabela 2 mostra a distribuição quantitativa das fases de ferro presentes na carepa. Observa-se que o ferro presente encontra-se majoritariamente sob a forma de wustita (FeO – 74%), seguido por magnetita (Fe_3O_4 – 18%), hematita (Fe_2O_3 -7%) e apenas 1% de ferro metálico.

Tabela 2. Quantificação das fases de ferro na carepa por Espectroscopia Mössbauer

Constituinte (% em massa)	Fe metálico	FeO	Fe_3O_4	Fe_2O_3
	1%	74%	18%	7%

2.1.2 Finos de carvão vegetal

A Tabela 3 apresenta a caracterização química dos finos de carvão vegetal utilizados na fabricação dos briquetes autorredutores.

Tabela 3. Análise imediata dos finos de carvão vegetal

Composição (% em massa)	Umidade	Mat. Volátil _{bs}	Cinza _{bs}	Carbono fixo _{bs}
	6,0	20,2	9,6	70,2

*bs= base seca.

2.1.3 Agentes ligantes

Como ligante utilizou-se melação e cal hidratada. A Tabela 4 apresenta a composição da cal utilizada. O melação utilizado apresentou 83,8°Brix de teor de açúcares.

Tabela 4. Composição da cal hidratada utilizada como ligante dos briquetes

Composição (% em massa)	Silica + insolúveis	Óxido de cálcio (CaO)	Óxido de magnésio (MgO)	Perda ao fogo
	4,6	39,5	28,8	26,5

2.2 Produção dos Briquetes Autorredutores

Para a produção dos briquetes autorredutores a carepa amostrada na usina foi preparada em duas distintas distribuições granulométricas, a fim de se verificar a importância do tamanho de partícula sobre as propriedades do briquete. A primeira amostra, denominada Carepa Grossa, foi obtida a partir da fração passante da carepa em peneira com abertura até 5 mm.

A segunda amostra, denominada Carepa Fina, foi obtida a partir da cominuição da carepa bruta em moinho de martelos. Ambos os lotes de carepas foram submetidos à análise granulométrica, conforme mostra a Figura 1-a. Os finos de carvão vegetal também foram submetidos à moagem. A distribuição granulométrica do redutor utilizado na produção dos briquetes está apresentada na Figura 1-a. A Figura 1-b apresenta o aspecto da Carepa Grossa, Carepa Fina e do carvão vegetal, utilizados para a fabricação dos briquetes autorredutores.

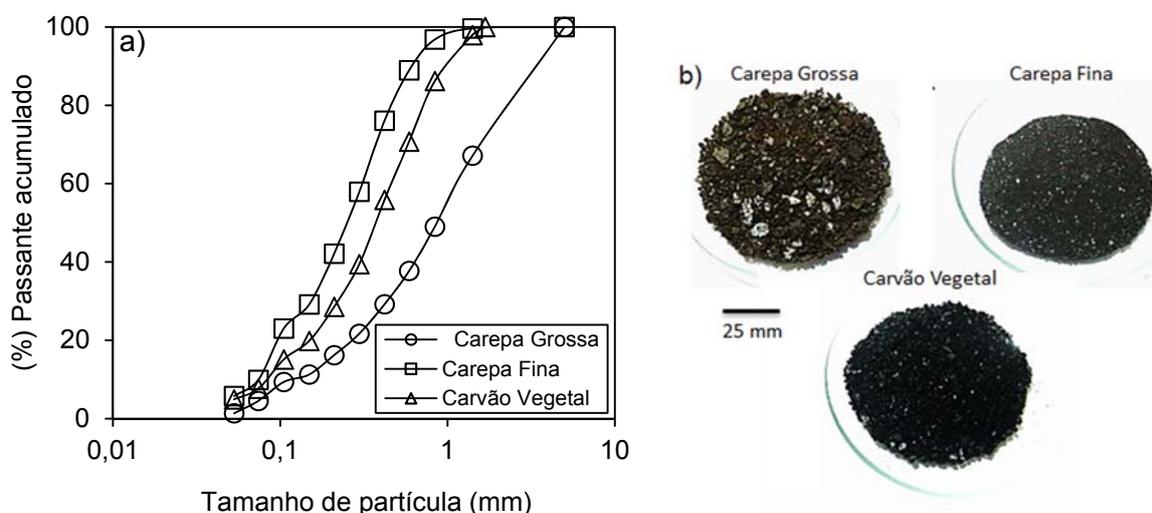


Figura 1. Distribuição granulométrica e imagem das matérias-primas utilizadas na produção dos briquetes.

Foram elaboradas misturas com Carepa Grossa ou Carepa Fina, carvão vegetal, cal e melação, conforme a Tabela 5. Para determinar a quantidade necessária de carbono nos briquetes, calculou-se, a partir da composição da carepa (Tabelas 1 e 2), o teor de oxigênio redutível presente no material, conforme a metodologia apresentada em trabalho anterior [7]. Visando-se um excesso de redutor no briquete, a relação mássica C/O do briquete foi de 0,92, valor acima do estequiométrico ($C/O = 0,75$) para a reação de redução dos óxidos da carepa ($Fe_xO_y + C = Fe_xO_{y-1} + CO$). Ao conjunto carepa + redutor foi adicionado ligante constituído de melação e cal. A mistura das matérias-primas foi feita com auxílio de uma betoneira, durante um período de 30 minutos. A briquetagem foi realizada a frio em uma briquetadeira industrial de rolos marca Komarek, modelo B400. Os briquetes confeccionados possuíam uma massa de aproximada 150g cada com formato de “travesseiro” (74x49x37 mm). Foram produzidos 200 kg de cada tipo de briquete, correspondendo a granulometrias diferentes de carepa. Os briquetes produzidos com Carepa Grossa foram denominados BCG, e aqueles produzidos com Carepa Fina BCF.

Tabela 5. Composição das misturas submetidas à briquetagem

Constituintes (% em massa)	Carepa (Grossa ou Fina)	Carvão Vegetal	Melação	Cal
	69,5	20,5	6,0	4,0

2.3 Ensaios de Autorredução dos Briquetes

Os ensaios de autorredução dos dois lotes de briquetes produzidos (briquetes com Carepa Grossa ou Carepa Fina) foram realizados em forno mufla, sob atmosfera ambiente. Foram realizados testes nas temperaturas de 1100, 1200 e 1260°C para cada lote de briquetes. Antes da realização de cada ensaio, o forno e um cadinho de grafita, revestido internamente com massa refratária de sílica, foi pré-aquecido por 5 minutos nas temperaturas de teste, para garantir a homogeneização térmica do conjunto. O tempo de permanência dos briquetes no interior do forno foi de 5, 10, 15 e 30 minutos em cada temperatura. Foram assim realizados quatro ensaios para cada lote de briquetes (BCG e BCF) em cada nível de temperatura pré-determinada, totalizando doze ensaios para cada lote de briquetes.

Os experimentos foram realizados a partir da abertura do forno e inserção de três briquetes no interior do cadinho pré-aquecido. Após o carregamento dos briquetes o forno foi fechado e a temperatura mantida no nível de temperatura determinado para cada ensaio até o final do tempo pré-definido. Após o período de residência, as amostras foram resfriadas em nitrogênio líquido, de forma a cessar instantaneamente as possíveis reações de redução e reoxidação da massa remanescente dos briquetes.

A sequência de imagens da Figura 2 ilustra o processo de carregamento, retirada e resfriamento dos briquetes. Posteriormente ao resfriamento, foram executadas no material coletado de cada ensaio análises químicas via úmida para obter-se o grau de metalização dos briquetes submetidos aos testes de autorredução.

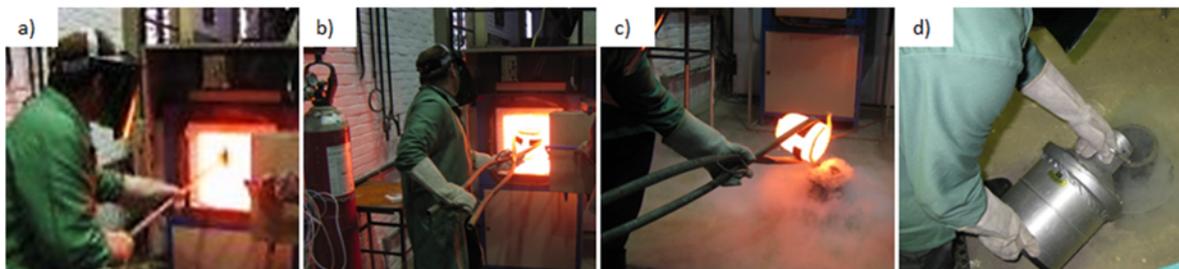


Figura 2. Sequência de operações utilizada na execução dos ensaios de autorredução: (a) carregamento dos briquetes; (b) retirada do cadinho após o término do tempo de ensaio; (c) retirada da massa de briquetes reduzida; (d) resfriamento com nitrogênio líquido.

2.4 Ensaio de Redução e Fusão

Este ensaio foi executado com a finalidade de avaliar o rendimento metálico dos briquetes em condições otimizadas de redução, seguido de fusão, bem como da geração de escória. O ensaio foi realizado em um forno da marca Linn, modelo HT 2100 com aquecimento resistivo. Este forno consiste basicamente de um tubo de grafita vertical com diâmetro de 145 mm, colocado em uma câmara isolada termicamente. O tubo e a câmara recebem durante a operação injeção de argônio de alta pureza para a remoção dos gases. Na Figura 3 visualiza-se o esquema do forno utilizado e o posicionamento da carga de briquetes em seu interior.

O ensaio foi efetuado com quatro briquetes produzidos com Carepa Grossa (BCG), com massa total de 592,7 g, colocados em um cadinho de alumina com 1000 mL de capacidade. O aquecimento do forno foi feito na razão de 5°C por minuto, atingindo-se a temperatura máxima de 1550°C, durante o tempo de cinco horas e dez minutos. Após o término do ensaio a amostra foi resfriada à temperatura ambiente, sob atmosfera de argônio. A liga ferrosa obtida no ensaio de redução e fusão foi posteriormente caracterizada por espectrometria de emissão ótica por centelha, utilizando-se de um espectrômetro marca Spectro.

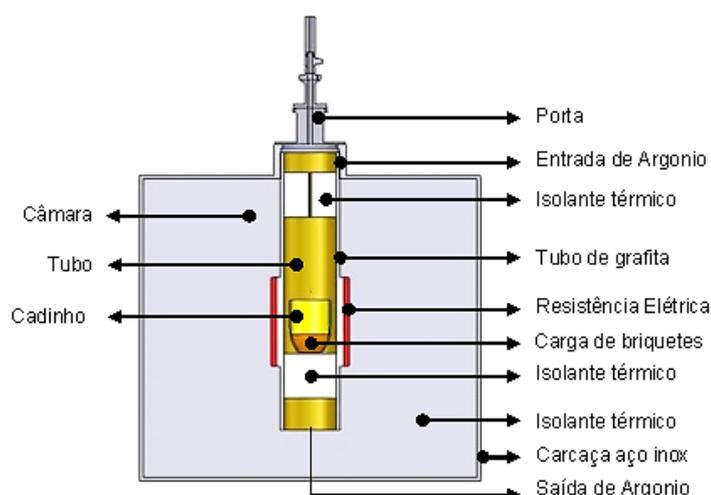


Figura 3. Diagrama do forno usado no ensaio de redução e fusão dos briquetes (Adaptado de [16]).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio de Redução

Após a bateria de ensaios de redução dos briquetes com carepa de granulometrias distintas (BCG e BCF), foram feitas análises químicas no material remanescente de cada ensaio. Nessas análises estabeleceu-se o grau de metalização dos briquetes, representado pelo percentual de ferro metálico sobre a quantidade de ferro total de cada amostra. Os resultados se encontram plotados em gráficos de grau de metalização (%) x tempo (min), conforme visualiza-se nas Figuras 4 e 5, respectivamente para os lotes 01 e 02.

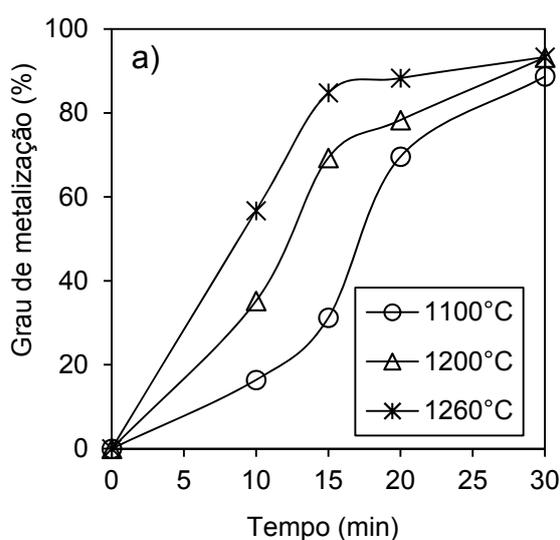


Figura 4. Grau de metalização em função do tempo e temperatura dos briquetes com Carepa Grossa (BCG).

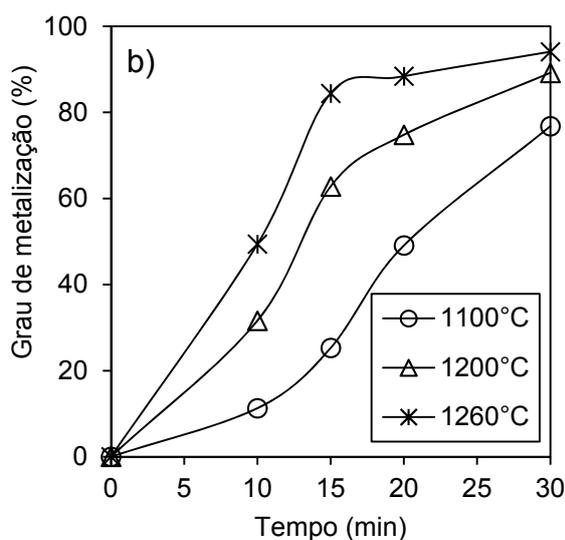


Figura 5. Grau de metalização em função do tempo e temperatura dos briquetes com Carepa Fina (BCF).

Observando-se os dados das Figuras 4 e 5 verifica-se que quanto maior a temperatura e o tempo de redução, maior é o grau de metalização obtido. Para ambos os tipos de briquetes, observa-se que nas temperaturas mais elevadas de teste (1200 e 1260°C), a velocidade de conversão dos óxidos a ferro metálico é praticamente linear durante os 15 minutos iniciais de ensaio, atingindo valores de metalização superiores a 60%. Após esse primeiro período, ocorre uma acentuada diminuição na velocidade de formação de ferro metálico, a qual é mais pronunciada para a temperatura de 1260°C. Já na temperatura mais baixa de teste (1100°C), o perfil verificado das curvas de metalização dos briquetes foi diferente. Nessa temperatura, a cinética de metalização das amostras durante os 15 minutos iniciais foi mais lenta, seguido por um período com maior velocidade de conversão. Por outro lado, pode-se verificar que para os dois lotes de briquetes, em todas as faixas de temperaturas, existe uma tendência de convergência dos graus de metalização para tempos maiores de ensaio.

Uma vez que a redução dos óxidos de ferro nas faixas de temperatura dos ensaios se processa primordialmente através do CO [17], a geração deste gás através da reação de Boudouard interfere diretamente na velocidade global de redução dos óxidos de ferro da carepa. Como esta reação tem caráter fortemente endotérmico, a transferência de calor nos briquetes tem influência fundamental no processo [18].

A granulometria das carepas (Grossa ou Fina) utilizada na produção dos briquetes parece afetar o grau de metalização obtido após os testes de autorredução. Essa diferença é mais acentuada nas temperaturas mais baixas. Observa-se que os briquetes produzidos com Carepa Grossa, quando submetidos a 1100°C, resultaram em valores mais altos de grau de redução que os briquetes com Carepa Fina. Essa diferença diminui à medida que a temperatura de teste aumenta, até o desempenho se tornar semelhante na temperatura de 1260°C. O menor grau de redução apresentado pelos BCF a 1100°C pode estar vinculado a uma menor taxa interna de transferência de calor nesta temperatura. Verifica-se então que além da vantagem cinética observada com o uso de carepa em granulometria grosseira, essa traz também vantagem do ponto de vista de processo, pois leva a menores custos de produção.

3.2 Ensaio de Redução e Fusão

Na execução do ensaio, observou-se a redução e posterior fusão da massa metálica ferrosa produzida (Figura 6). Após o resfriamento à temperatura ambiente, o material remanescente apresentava-se na forma de uma massa solidificada ao fundo do cadinho, rodeada na sua parte superior por uma linha de escória, margeando o cadinho de alumina e apresentando nítida separação.



Figura 6. Liga ferrosa obtida no ensaio de redução e fusão.

Os dados finais do ensaio estão colocados na Tabela 6. Efetuando-se a análise elementar da liga metálica obtida (318,8 g), obteve-se a composição percentual dos vários elementos constituintes da liga ferrosa. Os valores obtidos podem ser visualizados na Tabela 7.

Tabela 6. Frações de massa obtidas no ensaio de redução e fusão

Constituintes	Liga metálica	Escória	RC	Voláteis	Total
%	53,8	6,3	1,1	38,8	100

RC= Resíduo de aspecto carbonoso não incorporado.

Tabela 7. Constituintes da liga ferrosa obtida no ensaio de redução e fusão, % em massa.

Elementos	Fe	C	Cr	Mn	Ni	Si	P	S	W
% em massa	92,67	3,29	1,63	1,1	0,56	0,32	0,07	0,03	0,03

O resultado deste ensaio mostra o potencial de rendimento metálico dos briquetes já que a redução e a fusão do ferro reduzido ocorreu em condições favoráveis à maximização do rendimento. Avaliando o aspecto físico tanto da liga metálica quanto da escória, pode-se considerar que a composição do briquete adotada está adequada, já que ambos fundiram completamente. Devido ao excesso de carbono dos briquetes, a liga ferrosa obtida apresentou 3,29% em massa de carbono. Conforme relatado por Flores et al.[19], a carburação do ferro reduzido produzido a partir de misturas autorredutoras, ocorre majoritariamente através do contato direto das partículas carbonosas sólidas com o ferro. Salienta-se ainda que o processo de carburação do ferro reduzido tem fundamental importância no processo de fusão das amostras, uma vez que o aumento de carbono reduz a temperatura de fusão da liga. Pode-se notar também a presença de elementos de liga (Tabela 7), sendo destacados os teores de cromo, níquel, manganês e tungstênio. Estes elementos são provenientes das carepas e podem ter uma oscilação de seus teores em função da sua origem. Avaliando-se os teores máximos alcançados pelo enxofre e fósforo, que são elementos prejudiciais ao aço acima de certos limites, verifica-se que o enxofre encontra-se dentro da faixa de tolerância para a maioria dos aços e o fósforo está acima do valor de tolerância que fica em torno de 0,04% para a maioria dos aços. A presença maior de fósforo era esperada em função do redutor empregado e do caráter autorredutor dos briquetes. Entretanto, o impacto destes elementos agregados pelo agente redutor terá uma importância relativa tendo em vista o percentual de briquetes a ser eventualmente utilizado juntamente com a carga fria do FEA.

3.3 A Incorporação de Briquetes Autorredutores na Carga do FEA

Ao introduzir-se a idéia de reciclagem das carepas na forma de briquetes autorredutores para utilização como matéria-prima no FEA é necessário observar primeiramente a dinâmica de funcionamento deste equipamento. Nas usinas semi-integradas, o forno elétrico a arco é projetado para ser utilizado na função principal de fusão e refino primário de uma carga metálica basicamente constituída de sucatas ferrosas e escorificantes. Portanto, considerando-se a possibilidade de utilização complementar deste equipamento como reciclador de óxidos de ferro, será necessário um cuidadoso planejamento tanto da forma, quanto do percentual de adição destes aglomerados na carga normal do FEA. Além disto, será necessário ajuste dos parâmetros de operação.

Por outro lado, ao longo do tempo, este equipamento tem sofrido constantes aperfeiçoamentos na sua operação. Por exemplo, fatores como a redução do consumo de eletricidade, otimização dos tempos “tap-to-tap” e de fusão de cada cestão, flexibilização da carga e controle em tempo real dos gases de saída, têm sido aperfeiçoamentos introduzidos na busca de maior produtividade e eficiência.

Apesar dos novos recursos de operação e controle do FEA disponíveis atualmente, a colocação de briquetes compostos basicamente de carepas e de um agente redutor junto com a carga normal do FEA, poderá ter maior possibilidade de utilização desde que ocorra a transformação de um percentual aceitável do seu conteúdo de óxidos de ferro em ferro metálico num curto espaço de tempo.

Em paralelo, a introdução de briquetes autorredutores na carga deve ser planejada e otimizada de modo a manter a dinâmica do funcionamento do forno, evitando perdas de produtividade e eficiência. Também deve ser considerado que os briquetes ao serem incluídos na carga sofrerão aquecimento repentino, tanto em função das

características de operação do FEA quanto em razão do calor pré-existente de corridas anteriores. Este fator pode dar causa à crepitação, fenômeno que pode prejudicar o desempenho dos briquetes, uma vez que causa a fragmentação destes. Finalmente, deve-se observar a demanda energética, ou seja, a maior quantidade de energia a ser incluída em cada corrida para reduzir os óxidos de ferro contidos nos briquetes. Todos os fatores anteriormente citados certamente exercerão influência no percentual limite de briquetes com possibilidade de ser adicionado à carga do FEA.

4. CONCLUSÃO

Uma análise global dos resultados permite concluir pela potencialidade de utilização no FEA de briquetes autorredutores fabricados com carepas e finos de carvão vegetal como componentes da carga fria. Entretanto, para a efetiva implementação deste conceito torna-se necessário um dimensionamento complementar dos diversos fatores e conseqüências que poderão surgir pelo uso destes briquetes como parte da carga do FEA, bem como a execução de ensaios em escala industrial.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Usina Gerdau-Charqueadas pelo fornecimento da carepa utilizada no presente trabalho.

REFERÊNCIAS

1. Umadevi T, Sampath Kumar MG, Mahapatra PC, Mohan Babu T, Ranjan M. Recycling of steel plant mill scale via iron ore pelletisation process. *Ironmaking & Steelmaking*. 2009;36:409-415.
2. Takano C, Nascimento RC, Silva GFBL, Santos, DM, Mourão MB, Capocchi, JDT. Recycling of Solid Wastes from Integrated Steelmaking Plant: A Sustainable Alternative. *Metallurgical and Materials Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science, Sendai-Japan*, v. 42, n.12, p. 2506-2510, 2001.
3. Krzyzanowski M, Beynon JH, Farrugia DCJ. Oxide scale behavior in high temperature metal processing. Weinheim: Wiley - VCH; 2010.
4. Balajee SR, Callaway Jr. PE, Keilman LM. Production and BOF recycling of waste oxide briquettes containing steelmaking sludges, *Steelmaking Conf. Proc. Nashville, TN*. 1995;78:51- 65.
5. D'abreu JC, Oliveira LRF, Bentes MAG. Auto-redução de briquetes de resíduos siderúrgicos. XXX Seminário ABM de Redução de Minério de Ferro, Belo Horizonte, MG, 1999.
6. Batista E. A gestão de Resíduos e co-produtos na Arcelos Mittal Tubarão, 2008. 2º Wokshop de Sustentabilidade do Setor Siderúrgico Brasileiro, disponível em: http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/20080327_2workshopagregado_EltonBatista.pdf.
7. Buzin PJWK. Desenvolvimento de Briquetes Autorredutores a partir de Carepas de Processamento Siderúrgico para utilização em Forno Elétrico a Arco, Dissertação de Mestrado, PPGEM - Ufrgs, Porto Alegre, 2009.
8. Bagatini MC. Estudo de Reciclagem da Carepa através de Briquetes Autorredutores para uso em Forno Elétrico a Arco. Tese de Doutorado, PPGEM - Ufrgs, Porto Alegre, 2011.
9. Godinski NA, Kushnarev NN, Yakhshuk DS, Kotenev VI, Yu Barsukova E. Use of iron-carbon bearing briquettes in electric steelmaking, *Metallurgist*. 2003;47:16-19.

10. Nascimento RC, Lenz G, Martins D, Takano C, Mourão MBV. The carbothermic reduction of self-reducing briquettes containing wastes from blast furnace and BOF sludges, 5th Japan-Brazil Symposium on Dust Processing-Energy- Environment in Metallurgical Industries – ABM, v. 5, p. 507- 516, 2004.
11. Moon J, Sahajwalla V. Investigation into the role of the boudouard reaction in self-reducing iron oxide and carbon briquettes. Metallurgical and Materials Transactions B, v. 37B, p. 215-221, 2006.
12. Noldin Junior JH. Contribuição ao Estudo da Cinética de Redução de Briquetes Auto-redutores, Rio de Janeiro: PUC – RJ, 2002. Dissertação, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
13. Noldin Junior JH, D'abreu JC. Tecnoed Trios Convertendo custos em lucro. XXXV Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, set. 2005, Florianópolis, SC, Brasil.
14. Bagatini MC, Zymła V, Osório E, Vilela ACF. Carbon Gasification in Self-reducing Mixtures. ISIJ International, Vol. 54 (2014), No. 12, pp. 2687–2696.
15. Buzin PJWK, Bagatini MC, Schneider IAH, Vilela ACF, Osório E. Caracterização de Finos de Carvão Vegetal Produzidos no Estado do Rio Grande do Sul para uso em briquetes autorredutores. 64º Congresso Anual da ABM, 2009, Belo Horizonte, MG.
16. Bielefeldt VW, Marcon L, Vilela ACF. Estudo da Modificação de Inclusões de Alumina com Cálcio em Escala Laboratorial. XXXVIII Seminário de Aciaria Internacional, Belo Horizonte, MG, 2007, pg 788-796.
17. Carvalho RJ, Neto PGQ.; D'Abreu JC. Kinetics of reduction of composite pellets containing iron ore and carbon, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 33, n. 3, p. 217-225, 1994.
18. Bagatini MC, Zymła V, Osório E, Vilela ACF. Scale recycling through self-reducing briquettes to use in EAF. 6º International Congresso on the science and technology of ironmaking – ICSTI. Rio de Janeiro, Brazil, 2012.
19. Flores BD, Flores IV, Bagatini MC, Osório E, Vilela ACF. Study on reducing and melting behavior of mill scale/petroleum coke blend. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, 10 (2013), 365.