

ASPECTOS MORFOLÓGICOS E TEOR DE CARBONO DO FERRO METÁLICO GERADO NA REDUÇÃO DE BRIQUETES AUTO-REDUTORES

Karla de Melo Martins ¹

José Carlos D'Abreu ²

José Henrique Noldin Júnior ³

Resumo

Este trabalho descreve as diferentes morfologias do ferro metálico formado na redução de briquetes auto-redutores de minério hematítico e carvão mineral. Foi possível verificar que três tipos de morfologia do ferro podem acontecer durante o processo, dependendo basicamente da temperatura de teste. Estas três fases são: casca contínua e densa de ferro no exterior do aglomerado; esferas de ferro soltas no interior dos aglomerados; e a coexistência de whiskers e esferas de ferro metálico na zona de transição entre o centro e o exterior dos aglomerados. A medida do teor de carbono nas esferas e na camada externa de ferro, em função da temperatura e atmosfera gasosa dos testes, também é apresentada.

Palavras-chave: Auto-redução; Ferro; Carbono; Briquetes.

CARBON DISTRIBUTION AND MORPHOLOGICAL ASPECTS OF THE METALLIC IRON GENERATED DURING REDUCTION OF COLD BONDED SELF-REDUCING BRIQUETTES

Abstract

The present paper describes the morphology of the metallic iron phase formed in self-reducing agglomerates made of hematite ore and mineral coal. It was possible to verify three types of iron morphology may occur during the process, depending on the test temperature: a dense and continuous external iron shell; iron globules at the core of the briquettes; and the coexistence of whiskers and globules of metallic iron at the transition zone. The measurement of the carbon content on the globules and on the external iron layer for different tests temperature and gaseous environment is also presented.

Key words: Self-reduction; Iron; Carbon; Briquettes.

1 INTRODUÇÃO

A geração de finos e resíduos contendo altos teores de ferro e carbono nas atividades relacionadas à produção de aço, junto com legislações ambientais cada vez mais rígidas, tem servido como forças motrizes ao desenvolvimento de novas tecnologias de reuso e reciclagem destes materiais. Em muitas destas novas tecnologias, aglomerados auto-redutores (pelotas ou briquetes) vem sendo utilizados como carga em função das altas velocidades de reação e buscando evitar o uso de coque, além de garantir alta flexibilidade no uso de matéria-prima.⁽¹⁾

Em resumo, os processos de auto-redução garantem como vantagens, em relação aos processos convencionais, uma alta produtividade, alta flexibilidade de produção e de uso de matéria prima, além de alta eficiência energética e compatibilidade com as exigências ambientais do setor.⁽²⁾

Objetivando a avaliação do comportamento de briquetes auto-redutores em fornos de cuba, fatores críticos como temperatura de operação, tempo de redução, efeito do gradiente térmico na carga, atmosfera gasosa, teor de carbono e morfologia do ferro metálico formado foram investigados neste trabalho.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Preparação das amostras

Foram usadas neste trabalho amostras de briquetes auto-redutores (70% minério de ferro e 21% carvão mineral), aglomerados a frio e curados em um forno de mufla a 140°C durante 30 min.^(3, 4)

¹ M.Sc., doutoranda RWTH Aachen University, Germany

² Membro da ABM, D.Sc., Professor Associado da PUC-Rio

³ Membro da ABM, M.Sc., doutorando PUC-Rio, Gerente de Tecnologia da TecnoRed

Equipamentos utilizados

O equipamento utilizado para os experimentos de redução foi um forno aquecido eletricamente, composto de tubo de mulita de alta densidade com um diâmetro interno de 65 mm e comprimento de 1200 mm, com controle de temperatura e unido a uma linha de gases responsável pelo controle da pressão e atmosfera do forno (Figura 1).

Para a caracterização microestrutural das amostras após redução, micrografias foram realizadas usando uma lupa estereoscópica tipo Wild Heerbrugg, um microscópio óptico Axioplan e um microscópio eletrônico de varredura Zeiss DSM 960. Um analisador LECO CS-444 foi usado para determinar os teores de carbono das esferas e da casca externa de ferro metálico.

Condições de teste

Os experimentos foram realizados utilizando-se 3 amostras por teste, em temperaturas entre 1000 a 1350°C, 5 a 45 min de redução, obedecendo ao seguinte ciclo térmico inicial: 2 min a 200°C; 5 min a 400°C; 5 min a 700°C. Foram usados dois tipos de atmosfera gasosa, 100% N₂ e 100% CO com vazão de 2,5 e 1,0 L/min, respectivamente, ambas à pressão de 1 atm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para ilustrar o aspecto geral das amostras após redução, a Figura 2 mostra alguns briquetes seccionados, reduzidos nas temperaturas de 1200°C, 1300°C e 1350°C, entre 5 e 45 min de redução.

Morfologia do ferro metálico formado

Conforme mostrado na Figura 3, as amostras seccionadas mostraram uma morfologia característica do ferro metálico formado: a existência de várias pequenas esferas no núcleo e uma casca metálica contínua na periferia dos briquetes.

Usando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) e o microscópio óptico (MO), as seguintes caracterizações principais foram obtidas para as morfologias de ferro observadas:⁽⁵⁾

Redução a 1000°C

Para os briquetes reduzidos a 1000°C, após 45 min a região exterior do briquete apre-

sentou uma microestrutura de ferro metálico sinterizado (Figura 4) e uma microestrutura filamentar (whiskers de ferro) no centro dos aglomerados (Figura 5).

Redução a 1200°C

Para os briquetes reduzidos em 5 min à 1200°C, a morfologia encontrada na periferia dos briquetes ainda foi de filamentos de ferro, no entanto menores e cônicos (Figura 6). Por outro lado, para 45 min de redução, pequenas esferas de ferro começaram a ser encontradas no interior dos briquetes (Figura 7).

Também com o auxílio do acessório EDS acoplado ao MEV, foi possível verificar a presença de Si, Ca, e Fe nos glóbulos, sendo este último o seu principal constituinte.

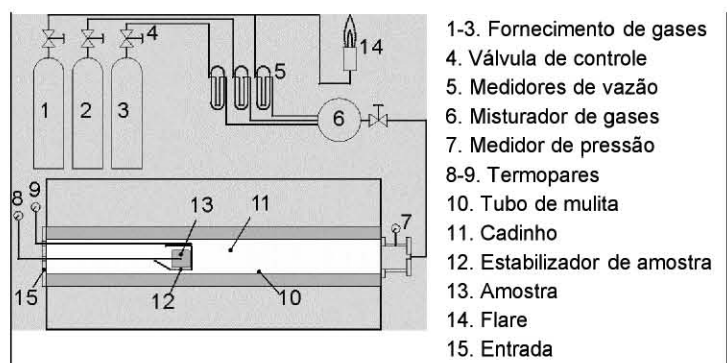


Figura 1. Equipamento utilizado para redução das amostras

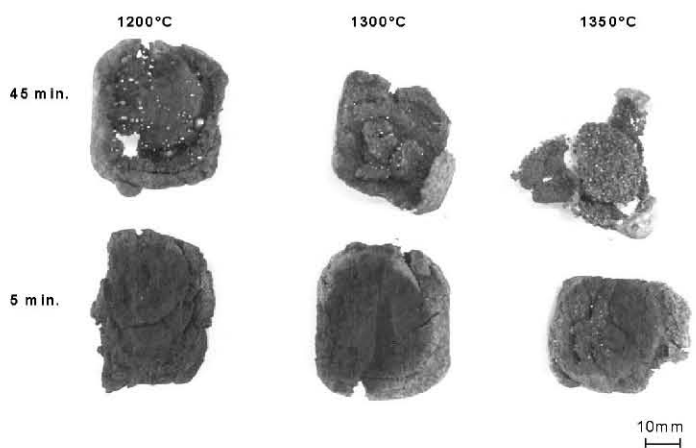


Figura 2. Seção transversal dos briquetes após redução

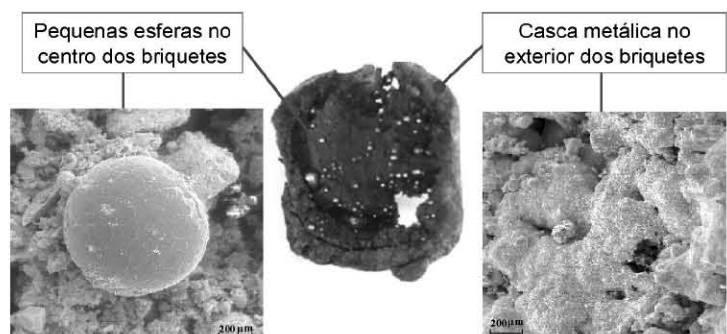


Figura 3. Morfologia característica dos briquetes reduzidos (1200°C e 45 min).

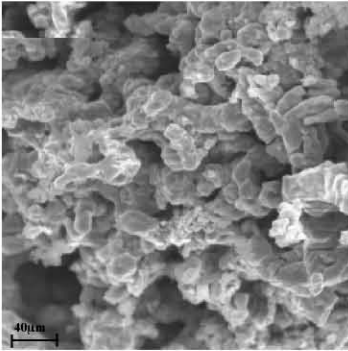


Figura 4. Casca externa. Sinterização do ferro formado (N₂, 45 min, MEV).

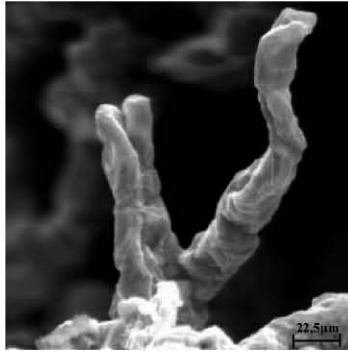


Figura 5. Whiskers de ferro no centro do aglomerado (N₂, 45 min, MEV).

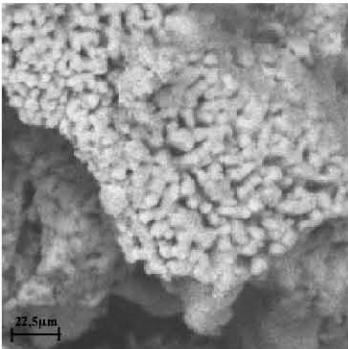


Figura 6. Filamentos cônicos na casca externa (N₂, 5 min, MEV).

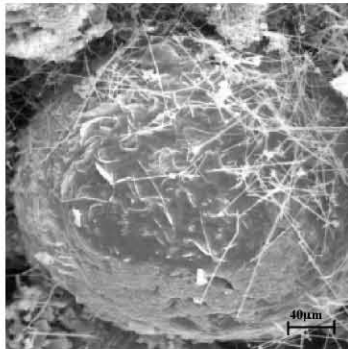


Figura 7. Esfera e whiskers de ferro, no interior (N₂, 45 min, MEV).

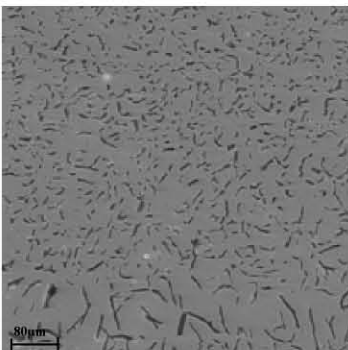


Figura 8. Presença de veios de grafita nas esferas de ferro (N₂, 45 min, MEV).

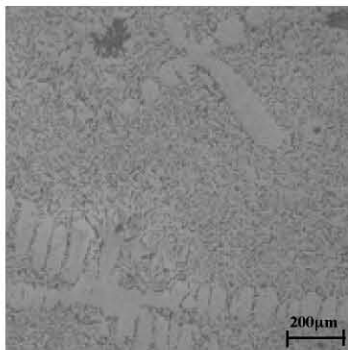


Figura 9. Estrutura dendrítica observada nas esferas de ferro (N₂, 45 min, MO).

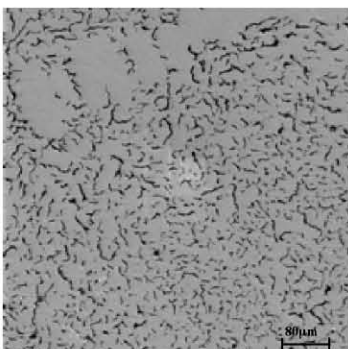


Figura 10. Presença de veios de grafita nas esferas de ferro (N₂, 10 min, MEV).

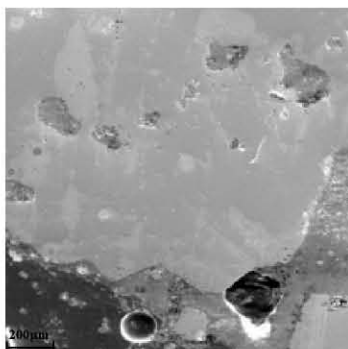


Figura 11. Camada externa densa de ferro (N₂, 10 min, MO).

Redução a 1300°C

As observações no MEV mostraram a presença de veios de grafita na matriz de ferro dos glóbulos, formadas pelo processo de carburização durante a sua geração (Figura 8). Adicionalmente, observações no microscópio óptico de alguns glóbulos seccionados mostraram a presença de estruturas dendríticas, sugerindo ter ocorrido fusão (Figura 9).

Redução a 1350°C

Observou-se que nesta faixa de temperatura, as esferas mostraram uma microestrutura similar àquela obtida na redução a 1300°C, isto é, a presença de veios de grafita e estrutura dendrítica (Figura 10). No entanto, conforme mostrado na Figura 11, uma espessa camada externa de ferro metálico, a presença de grandes vazios e uma contração dos briquetes foram observados, mesmo para tempos curtos de redução.

Gradiente térmico

Objetivando um melhor entendimento a respeito da morfologia do ferro metálico formado na superfície e no interior dos aglomerados, o gradiente térmico entre o centro e a periferia dos briquetes foi experimentalmente determinado (Figura 12).

O ciclo de aquecimento inicial dos testes mostrado na Figura 12, foi utilizado com a finalidade de simular condições industriais (auto-redução em fornos de cuba). A significativa diferença de temperatura entre a periferia e o interior das amostras comprovou a forte característica endotérmica da redução dos briquetes auto-redutores.⁽⁶⁾

Teor de carbono

Adicionalmente às observações acima, o teor de carbono das esferas e da camada externa de ferro dos briquetes foi determinado, conforme Figuras 13 e 14.

Como mostrado nas Figuras 13 e 14, o teor de carbono na casca externa sempre ficou abaixo do observado nas esferas, embora se verificasse para ambos o aumento na quantidade de carbono com a temperatura e o tempo. Adicionalmente, enquanto o teor de carbono na periferia (máx 1,3%) indicou a não ocorrência de fusão nesta região, as altas percentagens de carbono encontradas nos glóbulos (> 4%) sugeriram terem estes glóbulos passado previamente pela fase líquida.

Diagrama Fe-C

Fazendo uma comparação entre algumas tecnologias de produção de ferro primário (alto-forno, Tecnoled, Fastmet e ITmk3), nota-se com o auxílio do diagrama Fe-C que estas operam em regiões distintas do diagrama, em função da temperatura e do teor de carbono dos respectivos produtos. A Figura 15 mostra a região de operação destes processos, as temperaturas de teste e as faixas de carbono observadas na casca externa e nas esferas de ferro durante a realização deste trabalho. Pode ser verificado que os processos de soleira rotativa (ex.: Fastmet) operam em uma faixa de temperatura e teor de carbono que corresponde a uma área sólida do diagrama, enquanto o processo ITmk3 em uma área de coexistência sólido/líquido, e o processo Tecnoled em uma zona correspondente ao estado líquido do ferro, com um teor final de carbono médio entre os observados na casca externa e nos glóbulos.

4 CONCLUSÕES

Foram observados três tipos principais de morfologia do ferro metálico formado nos briquetes: uma casca externa densa e contínua; esferas de ferro no centro dos briquetes; e a coexistência de whiskers e esferas de ferro na zona de transição. A presença de veios de grafita, dendritas e alto teor de carbono nas esferas de ferro, sugerem que houve a fusão do ferro nesta região, e foram observados dois mecanismos possíveis para o crescimento das esferas de ferro: dissolução dos whiskers de ferro nas esferas e absorção das esferas menores pelas maiores.

O nível de carburação e o mecanismo de formação do ferro nos aglomerados auto-redutores são fatores relevantes no entendimento da forma, estrutura, estabilidade e local da zona coesiva em reatores do tipo Tecnoled.

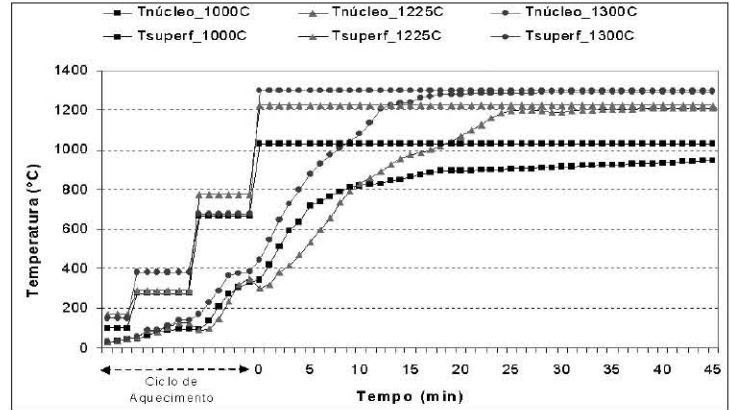


Figura 12. Gradiente térmico entre a periferia e o centro dos briquetes

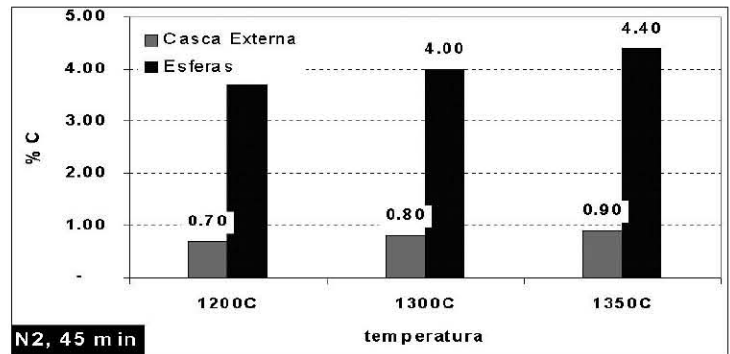


Figura 13. Teor de carbono dos briquetes (N₂, 45 min)

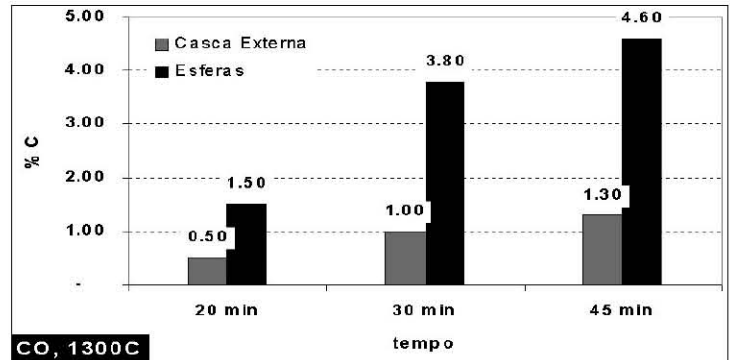


Figura 14. Gradiente térmico entre a periferia e o centro dos briquetes

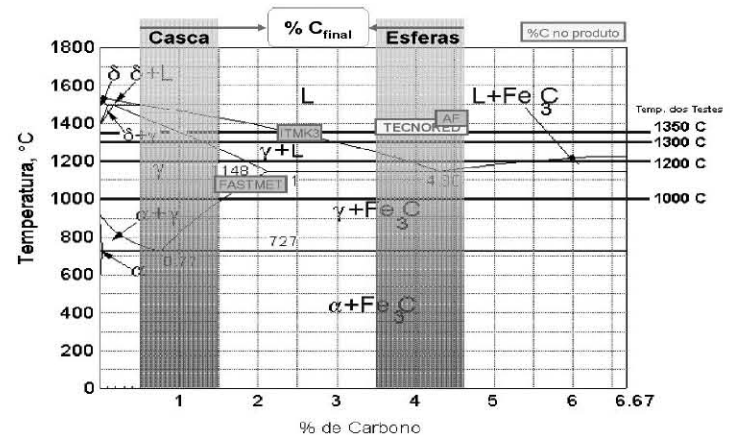


Figura 15. Teor de carbono dos briquetes (N₂, 45 min)

REFERÊNCIAS

- 1 NOLDIN JR, J.H.; D'ABREU, J.C.; KOHLER, H.M.; RODRIGUES FILHO, R.N.; MARTINS, K.M. A kinetic study of a self-reducing briquette aiming at the new ironmaking technologies. In: CONFERENCE OF METALLURGISTS, 41., 2002, Montreal. **Anais...** Montreal: CIM, 2002. 1 CD.
- 2 GUDENAU, H. W.; SENK, D.; BABISCH, A.; FRÖHLING, C.; KWEON, O.S.; WANG, S.; WIETING, T. Exchange and reduction of energy consumption for ironmaking and CO₂ problem. In: SCIENCE AND TECHNOLOGY OF INNOVATIVE IRONMAKING FOR AIMING AT ENERGY HALF CONSUMPTION, 2003, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo: ISIJ, 2003. p. 21-29.
- 3 D'ABREU, J.C.; MARTINS, K.M.; NOLDIN JR., J.H. Iron phase morphology of self-reducing briquettes. In: JAPAN-BRAZIL SYMPOSIUM, 4., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 2002. p. 89-101.
- 4 NOLDIN JR, J.H.; D'ABREU, J.C.; MARTINS, K.M. Kinetics and morphological studies of a carbon composite briquette aiming the emergent ironmaking technologies. In: TMS ANNUAL MEETING, 132., San Diego, EUA. **Proceedings...** Warrendale, PA: TMS, 2003. v.1, p. 901-916.
- 5 TAKANO, C.; MOURÃO, M.B.; D'ABREU, J.C.; NOLDIN JR, J.H. Physical and chemical behavior of self-reducing agglomerates. In: SCIENCE AND TECHNOLOGY OF INNOVATIVE IRONMAKING FOR AIMING AT ENERGY HALF CONSUMPTION, 2003, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo: ISIJ, 2003.p. 109-117.
- 6 D'ABREU, J.C.; NOLDIN JR., J.H.; MARTINS, K.M.; ARAUJO, D.R. Kinetics and morphological assessment of self-reducing briquettes of hematite and magnetite ores. IN: SCANMET-INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROCESS DEVELOPMENT IN IRON AND STEELMAKING, 2., 2004, Luleå, Suécia. **Proceedings...** Luleå: Mefos, 2004. v.2, p. 295-305.

Recebido em: 29/03/05

Aceito em: 23/09/05

Proveniente de: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE REDUÇÃO, 2., 2004, Vitória - ES. SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE MINÉRIO DE FERRO, 1., 2004, Vitória - ES. São Paulo : ABM, 2004.