

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA NA AUTORREDUÇÃO DE BRIQUETES PRODUZIDOS COM BIOMASSA DE CAPIM ELEFANTE*

Giulio Antunes de Medeiros¹
Rayla de Souza Caldas²
Leonardo Martins Silva³
Giselle de Mattos Araújo⁴
José Adilson de Castro⁵

Resumo

Para analisar a redução direta de briquetes autorredutores produzidos a partir de variados teores de pó de aciaria foram produzidos três lotes de misturas homogêneas a base de biomassa de capim elefante, minério de ferro, cimento e pó de aciaria elétrica em teores crescentes, os quais foram submetidos a ensaios termogravimétricos em forno de mufla e TGA em temperaturas e tempos variáveis. Foram obtidas as curvas dos graus de redução e os briquetes reduzidos foram analisados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-X (DRX). Os resultados demonstraram que a redutibilidade do aglomerado decresceu com o aumento do teor de pó de aciaria, havendo variações neste resultado para temperaturas mais elevadas. As microestruturas encontradas foram de particulado esférico, estrutura porosa ou *whiskers*. A partir da DRX, considerou-se provável que a diminuição do grau de redução com o aumento do pó de aciaria esteja relacionado à reação entre hematita e zincita, que se espera ser controlada pela difusão do zinco.

Palavras-chave: Autorredução; Termogravimetria; Pó de Aciaria Elétrica; Capim Elefante.

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF ELECTRIC ARC FURNACE DUST CONTENT ON THE SELF-REDUCTION OF BRIQUETTES PRODUCED WITH ELEPHANT GRASS BIOMASS

Abstract

To analyze the direct reduction of self-reducing briquettes produced with different electric arc furnace dust contents, three sets of homogeneous mixtures were produced with elephant grass biomass, iron ore, cement and furnace dust in increasing levels, which were submitted to thermogravimetric tests in muffle furnace and TGA furnace at variable temperatures and times. The curves of degree of reduction were obtained and the reduced briquettes were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The results showed that the reducibility of the agglomerates is diminished by the increase of furnace dust, with variations of this result at higher temperatures. The observed microstructures were spherical particles, porous structure or whiskers. Based on XRD results, it was considered probable that the decrease of the degree of reduction with the increase of furnace dust content is related to the reaction between hematite and zincite, which is expected to be controlled by zinc diffusion.

Keywords: Self-reduction; Thermogravimetry; Electric Arc Furnace Dust; Elephant Grass.

¹ Engenheiro Metalurgista, Bel., mestrando, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica (PPGEM), Universidade Federal Fluminense (UFF), Volta Redonda, RJ, Brasil.

² Engenheira Metalurgista, M. Sc., pesquisadora, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica (PPGEM), Universidade Federal Fluminense (UFF), Volta Redonda, RJ, Brasil.

³ Químico, D. Sc., pesquisador, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica (PPGEM), Universidade Federal Fluminense (UFF), Volta Redonda, RJ, Brasil.

⁴ Engenheira Metalurgista, D. Sc., professora, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais (VMT), Universidade Federal Fluminense (UFF), Volta Redonda, RJ, Brasil.

⁵ Engenheiro Metalurgista, Ph. D., professor, pesquisador, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica (PPGEM), Universidade Federal Fluminense (UFF), Volta Redonda, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O aço é a liga metálica mais amplamente utilizada no mundo, sendo natural que se encontre em evolução contínua, buscando maximizar parâmetros como eficiência energética, controle do uso de recursos naturais e, principalmente impactos ambientais.

Neste cenário, um dos grandes problemas enfrentados pela indústria siderúrgica é a geração de resíduos sólidos como as escórias e o pó de aciaria, material particulado emitido através dos gases de topo dos fornos elétricos a arco e conversores LD.

Gerados a partir da volatilização dos componentes da carga, que entram na fase de vapor durante a fusão da sucata, e sequente aglomeração e transformações físico-químicas, quando este vapor é resfriado e coletado no sistema de gás [1], esta é taxada como um resíduo perigoso por diversos órgãos governamentais [2], sendo que, uma vez descartados erroneamente podem acarretar inúmeros problemas ambientais como a degradação do solo, contaminação dos lençóis freáticos e muitos outros [3], e assim, requerendo um correto processamento e posterior descarte que, por sua vez, demandam elevado custo [4].

A depender da composição da sucata utilizada, elementos como ferro, zinco e silício são encontrados nas poeiras de aciaria, com o primeiro presente em maior porcentagem na forma de hematita (Fe_2O_3), sendo que esta representa cerca de 50% da composição da poeira de aciaria, o que por sua vez torna economicamente vantajosa a sua reciclagem no processo siderúrgico [5]. Resíduos a base de zinco como a zincita (ZnO) e a ferrita de zinco ($ZnFe_2O_4$) também podem compor grande parte da poeira de aciaria, devido ao uso de sucatas de aços galvanizados que fazem variar o teor deste entre 7 e 40% [1], e processos de remoção ou reciclagem destes compostos tem sido alvo de diversos estudos [6][7].

Embora cerca de 80% dos resíduos a base de ferro sejam recuperados por sinterização, esta acaba por gerar uma diminuição na produtividade da mesma uma vez que as partículas ultrafinas reduzem a permeabilidade do leito da carga [8].

Desta forma, o crescimento de processos como o reaproveitamento dessas partículas ricas em óxidos de ferro na injeção do forno juntamente com material carbonáceo ou a aglomeração para autorredução, tanto na pelletização, quanto na briquetagem se deve, entre outros fatores, à escassez de finos de minério adequados à sinterização [9]. O processo de autorredução, por sua vez, caracterizado como uma alternativa mais eficiente, barata, limpa e flexível em relação ao processo de redução indireta que ocorre nos altos-fornos, se refere ao uso de aglomerados à base de finos de minério de ferro e material carbonáceo, podendo, além destes, conter ou não fluxantes e aglomerantes. As trocas térmicas e o contato intenso entre as partículas do interior do aglomerado tendem a garantir altas taxas de reação e, assim, menores tempos de residência em forno [10][11].

Paralelamente, a utilização do carvão mineral na siderurgia foi responsável por cerca de 5% das emissões mundiais de CO_2 em 2009, passando para cerca de 10% em 2011, o que representa uma crescente alarmante do ponto de vista ambiental [12]. Sendo uma fonte de energia não-renovável com um futuro esgotamento esperado, além de questões ambientais relacionadas principalmente ao efeito estufa, é natural que alternativas ao emprego de carvão mineral sejam apresentadas. Estudos acerca do emprego do carvão vegetal e outras biomassas como agentes redutores no processo siderúrgico [5,13] têm apontado para vantagens como facilidade na obtenção de temperaturas de reação e uma catalização da reação de Boudouard.

O presente trabalho visa analisar a redução direta de briquetes autorredutores produzidos a partir de variados teores de pó de aciaria provenientes da indústria Rio Metalúrgica, em Duque de Caxias – RJ, de forma que se possa analisar a influência das quantidades de zinco na eficiência e cinética das reações de redução dos óxidos de ferro, bem como a eficácia da biomassa de capim elefante como fonte de carbono.

Com este objetivo, foram realizados ensaios cinéticos experimentais em forno de mufla e em forno TGA sob atmosfera inerte de nitrogênio para a avaliação do grau de redução para diferentes composições do briquete, temperaturas e tempo de permanência no forno.

Para a identificação das fases formadas durante a redução também foram analisados a evolução microestrutural resultante dos ensaios em forno de mufla por meio de microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

2.1.1 Produção dos Briquetes

Para a produção dos briquetes, foram utilizados poeira de aciaria doada pela empresa Rio Metalúrgica S/A, em Duque de Caxias – RJ, finos de minério de ferro oriundos da empresa Vale, biomassa de capim elefante utilizada como fonte de agente redutor, vindos da Universidade Federal do Norte Fluminense (UENF), e cimento Portland comum de lote comercial.

Foram preparados 3 diferentes lotes de misturas autorredutoras homogeneizadas por quarteamento e com composições definidas segundo a Tabela 1.

Tabela 1. Teores de matérias-primas utilizadas para cada lote

Matéria-prima	Lote A1	Lote A2	Lote A3
Pó de Aciaria	15,00%	22,50%	30,00%
Minério de Ferro	36,79%	29,29%	21,79%
Capim Elefante	35,71%	35,71%	35,71%
Cimento	12,50%	12,50%	12,50%

A partir destes lotes, para cada briquete pesou-se de 3 à 4 g das misturas e adicionou-se cerca de 30 gotas de água para beneficiar a atuação do cimento, aumentando a resistência final dos briquetes. A massa resultante foi adicionada a uma matriz fabricada em aço inoxidável, de diâmetro interno de 12 mm e esta passou por ensaio de compressão em prensa hidráulica, modelo EMIC 23-20, com capacidade de 20kN, da marca Instron/EMIC. A carga aplicada foi de 18,5 kN. Após serem retirados do molde, os briquetes foram separados para secagem. Com estes procedimentos foram obtidos 40 briquetes por lote, totalizando 120 amostras e seguiu-se para os ensaios de redução.

2.1.2 Ensaios Termogravimétricos

Os ensaios em forno de mufla foram realizados para a análise e comparação do grau de redução dos briquetes dos 3 lotes em 3 diferentes temperaturas, sendo essas 800°C, 900°C e 1000°C, em cada qual 5 tempos de residência em forno distintos foram utilizados: 12, 24, 36, 48 e 60 minutos. Duas amostras foram

reduzidas a cada ensaio utilizando atmosfera inerte de nitrogênio (N₂) com fluxo de 1 L/min e para evitar riscos de contaminação do forno pelas amostras utilizou-se uma cuba de aço inoxidável. Utilizaram-se ainda suportes para carregar os briquetes que permitem sua inserção e remoção do interior da cuba. Utilizando o calorímetro Spider 8 e com a inserção de termopar do tipo K, foram levantados os perfis térmicos de aquecimento da cuba e do briquete (lote A3) (Figura 1) para a temperatura de 1000°C afim de assegurar que ambos atingissem as temperaturas objetivadas. Por meio destes resultados foi possível analisar a distribuição de calor no interior dos aglomerados, obtendo uma estimativa do tempo necessário para que uma vez dentro do forno os briquetes iniciassem o processo de redução. Este tempo foi compensado na realização dos ensaios cinéticos.

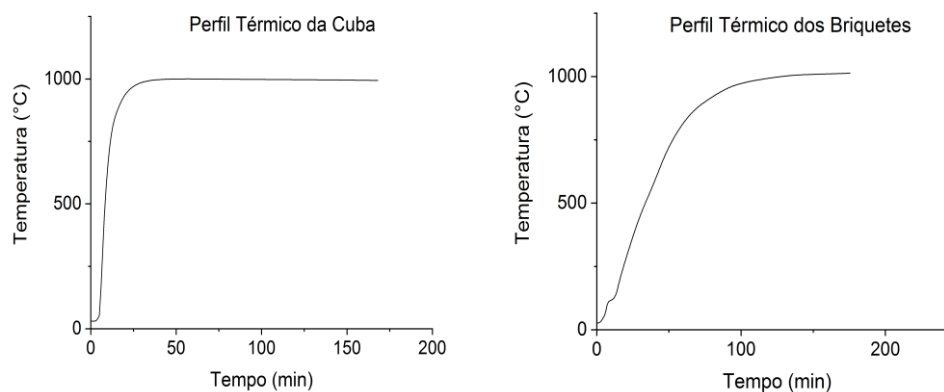


Figura 1. Perfil térmico de aquecimento da cuba (esquerda) e dos briquetes autorredutores (direita).

Para complementação e comparação dos resultados com os ensaios realizados em forno de mufla, foram executados os ensaios adicionais em TGA para todos os lotes de misturas, desta vez, utilizando uma vazão de nitrogênio de 100 ml/min e somente até a temperatura de 800°C para todas as amostras. Apenas para o lote A3 prosseguiu-se para o TGA em temperaturas maiores (900°C e 1000°C) afim de confrontar resultados específicos obtidos em forno de mufla.

Com o objetivo de determinar a fração convertida α dos briquetes, estes foram pesados anteriormente e posteriormente aos ensaios cinéticos de forma que a Equação 1 pudesse ser aplicada.

$$\alpha = \frac{M_i - M_f}{M_i - M_t} \quad (1)$$

Onde M_i é a massa inicial, M_f é a massa final e M_t é a massa final de um briquete com todo o conteúdo inicial de ferro convertido.

2.1.3 Caracterização Microestrutural e Análise Química

A caracterização microestrutural e análise química foram realizadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X (DRX) com o intuito de analisar a evolução da morfologia das partículas e formação de fases ao longo do tempo. A análise por EDS também foi empregada para auxiliar na justificação das microestruturas.

Para minimizar ou eliminar a carga elétrica acumulada pelas amostras, proporcionar uma melhor visualização em MEV e garantir a aderência da fita carbono às

amostras, fez-se necessário pintar uma pequena região de cada uma delas com tinta de prata e colar a fita carbono exatamente sobre essa região. Em seguida, as amostras passaram por metalização, sendo recobertas com ouro através do equipamento EMITECH modelo K550 por 2 minutos. O modo de varredura utilizado foi o SE, com tensão de 5 kV ou 8 kV, distância de trabalho WD variando entre 9 e 13 mm e spot size variando entre 520 e 540, com algumas amostras necessitando de spot size próximos à 360.

A difração de raios-X foi realizada por meio do equipamento Bruker, modelo D4 Endeavor, através do método do pó para as amostras ensaiadas a 1000°C em forno de mufla. A amostra foi inicialmente moída em equipamento McCrone com jarro plástico e meio moedor de ágata em água deionizada (entre 12 e 15 ml) por 10 minutos, para garantir granulometria menor que 10 µm. O material foi então descarregado em placa de Petri de PTFE e seca em estufa a 50°C sendo depois desagregada por moagem suave em grau de ágata para conformação em suporte tipo “backload” para a análise por DRX.

Os difratogramas e as interpretações qualitativas de espectro foram efetuadas por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF-04 [14] em software Bruker-AXS Diffrac.Eva 4.3. Foi utilizada radiação de Cobalto K α , com comprimento de onda de 1,79 Å e a varredura foi realizada na faixa de 4 a 105°, com velocidade do goniômetro de 0,02° por passo com tempo de contagem de 1 segundo por passo.

2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 Ensaios Termogravimétricos

Os graus de redução obtidos por ensaio em forno de mufla para cada lote nas 3 temperaturas analisadas podem ser observados na Figura 2. Como esperado, há um aumento no grau de redução de acordo com o aumento da temperatura para todas as misturas, alcançando em torno de 70% para a temperatura de 1000°C para todas as composições analisadas, visto o caráter endotérmico das reações de redução ocorridas.

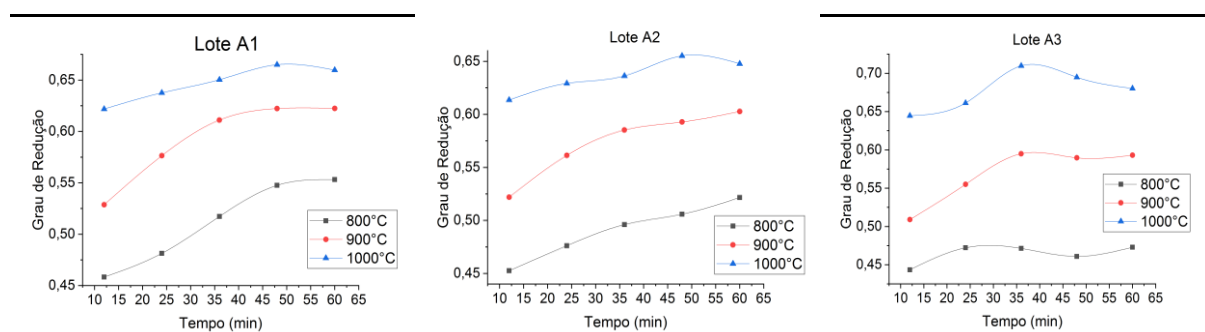


Figura 2. Graus de redução para os lotes A1, A2 e A3 nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C em ensaio em forno de mufla.

Obeve-se adicionalmente gráficos que traçam um comparativo entre os 3 lotes de misturas para as temperaturas avaliadas (Figura 3), a partir dos quais concluiu-se que a composição do lote A1, que possui menor teor de pó de aciaria, demonstra, nas temperaturas de 800°C e 900°C, maior efetividade no processo de redução. No entanto, para temperaturas mais elevadas, o lote A3 é o que passa a possuir maiores graus de redução, exibindo elevada superioridade em relação as demais misturas na temperatura de 1000°C. Nesta mesma temperatura, os lotes A1 e A2

exibem resultados substancialmente inferiores aos obtidos para os mesmos em temperaturas inferiores. Observa-se ainda que os lotes A1, A2 e A3 apresentam grau de redução praticamente iguais para os dois primeiros instantes analisados.

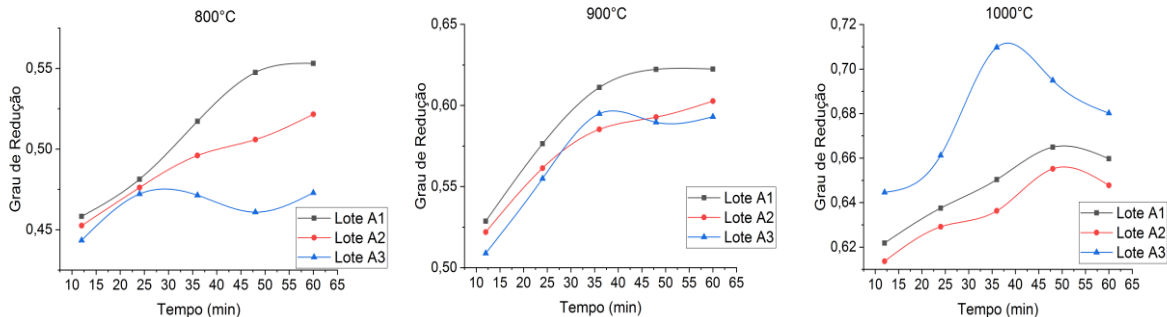


Figura 3. Comparativo entre os graus de redução dos lotes para cada temperatura em ensaio em forno de mufla.

Gráficos do mesmo tipo foram obtidos para os ensaios em TGA até 800°C para todos os lotes e até 900°C e 1000°C para o lote A3, conforme ilustrado na Figura 4. Estes mostram, diferentemente dos resultados obtidos para o forno de mufla, a dependência do grau de redução em relação, não só à temperatura, mas também ao tempo, como era previsto. Confirmou-se também a tendência a diminuição da redutibilidade conforme se aumenta o teor de poeira de aciaria das misturas. O lote A3, no entanto, não demonstrou acréscimo no grau de redução para a temperatura de 1000°C, como foi constatado no ensaio em forno de mufla, mantendo um mesmo patamar de cerca de 40% para as temperaturas de 800°C e 900°C.

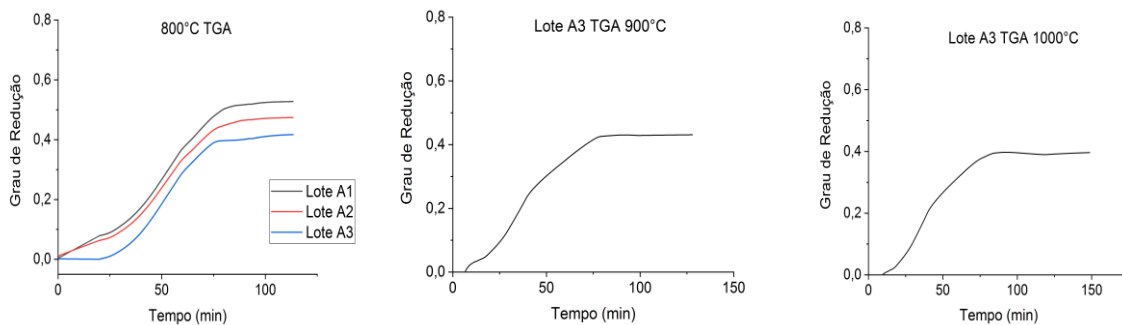


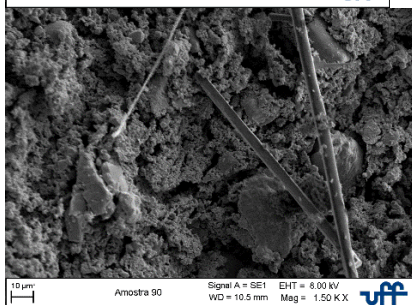
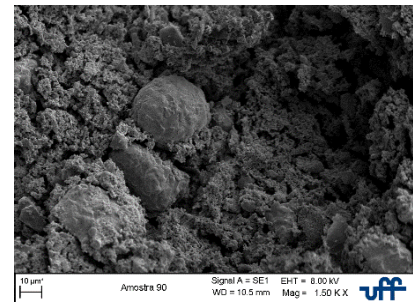
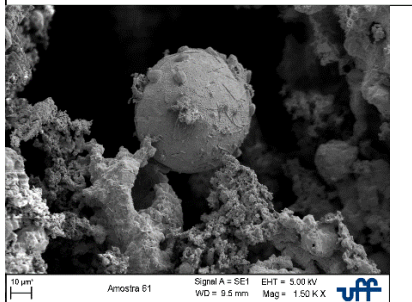
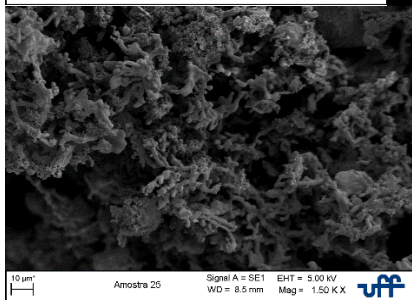
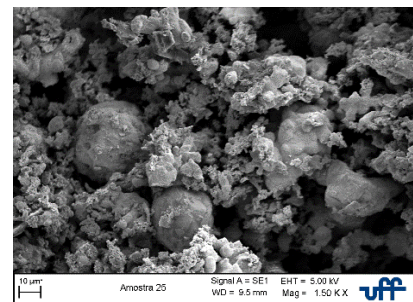
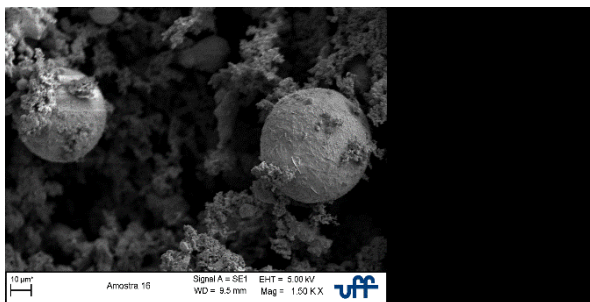
Figura 4. Graus de redução para os lotes A1, A2 e A3 em ensaio TGA até temperatura final de 800°C (esquerda) e graus de redução para o lote A3 em ensaio TGA até as temperaturas de 900°C e 1000°C (centro e direita).

2.2.2 Caracterização Microestrutural

As micrografias obtidas por MEV podem ser visualizadas na Figura 5. Para todos os lotes de amostras, foram observadas 3 microestruturas recorrentes. As microestruturas mais comuns são os particulados esféricos (coluna esquerda da Figura 5), podendo ser característicos da presença de óxidos de ferro que passaram por processo de fusão e solidificação de gotículas nos fornos elétricos a arco [5,10,15]. A análise por EDS confirmou elevados níveis de ferro e oxigênio nestas partículas, o que corrobora esta hipótese.

Outra microestrutura comum é a que frequentemente aparece envolvendo as partículas esféricas, caracterizada por sua porosidade (coluna central da Figura 5). Esta, ainda que de acordo com as análises feitas por EDS contenha também elevados teores de ferro e oxigênio, não tem a mesma origem que a microestrutura anteriormente citada devido à ausência do formato esférico e, sendo portanto provavelmente originada durante o processo de redução.

A última das microestruturas comuns são os *whiskers* (coluna direita da Figura 5), estruturas finas ou filamentosas de diversos tamanhos e distribuições que possuem uma razão comprimento-diâmetro bastante elevada. Estas foram observadas principalmente para os briquetes ensaiados a 1000°C por 60 minutos. Tal microestrutura se assemelha muito àquela obtida por outros estudos que realizaram ensaios de redução a 1000°C [9,16], sendo classificada da mesma forma por seus autores.



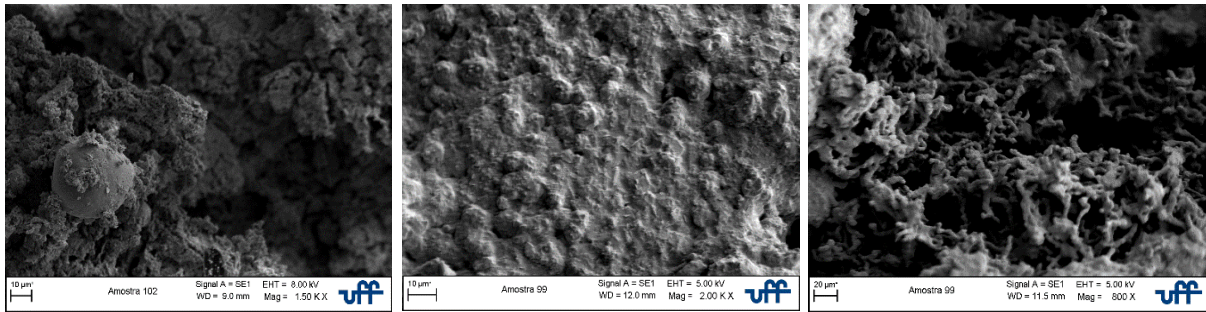


Figura 5. Microestruturas típicas encontradas em análise em MEV para as amostras reduzidas. Particulados esféricos (coluna esquerda), matriz porosa (coluna central) e *whiskers* (coluna direita).

2.2.3 Análise Química

A análise química se deu por meio de difração de raios-X e os resultados para a temperatura de 1000°C, nos tempos de 12 e 60 minutos podem ser observados na Tabela 2. A partir dos resultados pode-se formular hipóteses para a queda do grau de redução conforme se aumentou o teor de pó de aciaria. A presença de fases como a franklinita (ferrita de zinco) sugerem uma reação da hematita com a zincita, o que reduz o óxido de ferro disponível à redução. Ainda que a proporção de ferrita de zinco seja relativamente baixa, a suposição anterior ainda é válida devido ao fenômeno de decomposição desta que ocorre dentro das faixas de temperatura dos ensaios realizados [3]. Desta forma, conjectura-se que a ferrita de zinco decompõe em outros óxidos de zinco, proposta que de fato toma forma com base nas quantidades destes óxidos observados.

Ainda assim, pode-se observar a formação de grande quantidade de ferro para algumas amostras. Para briquetes do lote A3 que permaneceram por 60 minutos a 1000°C, por exemplo, obteve-se mais de 53% de metalização. Acredita-se que nesses casos, nos quais houve uma maior formação de ferro, a reação entre zincita e hematita tenha ocorrido em menor proporção, reduzindo a interferência na reação entre a hematita e o CO.

Fazendo uma comparação geral entre os resultados da difração de raios-X para todos os lotes de amostras, na medida em que a hematita decaí, a magnetita, a wustita e o ferro são produzidos simultaneamente e, posteriormente, a magnetita e a wustita decaem, com o aumento da formação do ferro. Ademais, observamos que a presença do pó de aciaria elétrica resultou em uma maior formação de ferro, quando as amostras eram expostas a um maior tempo de ensaio (60 minutos), em temperaturas mais elevadas (1000°C).

Tabela 2. Resultados da difração de raios-X para os 3 lotes de amostras reduzidos a 1000°C

Fase	Lote A1		Lote A2		Lote A3	
	Wt (%)		Wt (%)		Wt (%)	
	12 min	60 min	12 min	60 min	12 min	60 min
Hematita	36,3	38,7	25,1	32,4	48,5	6,0
Magnetita	45,0	26,7	49,2	43,2	21,2	1,7
Wustita	0,4	0,2	1,0	1,1	0,4	0,0
Quartzo	3,8	2,6	3,4	3,1	2,3	5,4
Ferro	0,6	6,3	2,1	1,2	10,2	52,5
Calcita	0,9	0,0	0,0	2,6	0,0	0,0
Dolomita	6,1	10,8	9,9	9,1	7,7	23,4
Coesita	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zincita	1,6	3,3	2,3	3,4	2,7	6,8

Franklinita	0,0	0,3	0,3	0,4	0,8	0,0
Óxido de Ferro e Zinco	2,8	1,7	3,3	2,0	3,5	2,1
Coesita, syn	2,5	9,4	3,5	1,5	2,7	2,1

3 CONCLUSÃO

A introdução de teores crescentes de pó de aciaria elétrica em misturas autorredutoras com capim elefante como substância carbonácea tem como efeito mais comum, a diminuição do grau de redução ou fração convertida de uma amostra. Ainda para proporções maiores de pó de aciaria e temperaturas mais elevadas, observou-se o maior grau de redução, resultado este que, segundo a análise por DRX pode ser devido a uma menor reatividade entre a hematita e a zincita. Para temperaturas na faixa de 800°C a 900°C, no entanto, é provável que ocorra considerável formação de franklinita (ferrita de zinco) ainda que esta seja residual nas análises. Isso se deve ao fato de que as temperaturas em que os ensaios de redução são realizados propiciam a decomposição da mesma em óxidos de ferro e zinco que, por sua vez, se encontram em maiores quantidades.

Agradecimentos

À CAPES e ao CNPq pela concessão de bolsa de estudos durante a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Omran M., Fabritius T. Effect of steelmaking dust characteristics on suitable recycling process determining: Ferrochrome converter (CRC) and electric arc furnace (EAF) dusts. Powder Technology. 2017;
- 2 ABNT NBR 10004/2004. Resíduos Sólidos – Classificação.
- 3 Marroquin, M. C. G. Caracterização e Cinética da Redução de Ferrita de Zinco Presente em Poeiras de Aciaria por Misturas COCO₂. Tese de Doutorado—Rio de Janeiro - RJ: Pontifícia Universidade Católica, 2008.
- 4 Medeiros, E. F. Siderurgia no Brasil 2010-2025. Brasília: CGEE, 2010.
- 5 Rocha, E. P. Avaliação Numérica e Experimental da redução em Forno de Cuba utilizando Pelotas Convencionais e Autorredutoras produzidas com Biomassa de Capim Elefante (*Pennisetum purpureum* SCHMACH). Tese de Doutorado—Volta Redonda - RJ: Universidade Federal Fluminense, 2016.
- 6 Ferreira Felipe Buboltz, Flores Bruno Deves, Osório Eduardo, Vilela Antônio Cezar Faria. Evaluation of zinc removal and compressive strength of self-reducing pellets composed of Electric Arc Furnace Dust. SciELO Journals [Internet]. 2019 [citado em 2019 Jun. 23]; Disponível em: https://scielo.figshare.com/articles/Evaluation_of_zinc_removal_and_compressive_strength_of_self-reducing_pellets_composed_of_Electric_Arc_Furnace_Dust/7677026.
- 7 Omran Mamdouh, Fabritius Timo, Heikkinen Eetu-Pekka. Selective Zinc Removal from Electric Arc Furnace (EAF) Dust by Using Microwave Heating. Journal of Sustainable Metallurgy. 2019;
- 8 TAKANO, C. et al. A Reciclagem De Resíduos Siderúrgicos Sólidos. In: Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais. Secretaria do Meio Ambiente Do Est. S. Paulo. São Paulo - SP, a 31/8 2000.

- 9 Araújo, G. de M. Estudo da Cinética de Redução dos Óxidos de Ferro com a Proposição de um Novo Aglomerado Autorredutor. Tese de Doutorado—Volta Redonda - RJ: Universidade Federal Fluminense, 2013.
- 10 Noldin Jr, J. H. Contribuição ao Estudo da Cinética de Redução de Briquetes Autorredutores. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro - RJ: Pontifícia Universidade Católica, 2002.
- 11 Ahmed H. M., Viswanatha N. N., Björkman B. Isothermal reduction kinetics of self-reducing mixtures. Ironmaking & Steelmaking. 2017;
- 12 Marcovitch, J. Estratégias Empresariais e a Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). 2014.
- 13 Ueda, S. et al. Improvement of Reactivity of Carbon Iron Ore Composite with Biomass Char for Blast Furnace. ISIJ International, 2009.
- 14 ICDD. International Centre for Diffraction Data – PDF-04 Relational Powder Diffraction FileNewton Square, PA, 2018
- 15 Mantovani M. C. Caracterização de poeiras geradas em fornos elétricos a arco e seu estudo quando aglomeradas na forma de pelotas auto-redutoras. Tese de Doutorado—São Paulo - SP: Universidade de São Paulo, 1998.
- 16 Martins, K. DE M. Morfologia do Ferro Metálico em Briquetes Auto-Redutores. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro - RJ: Pontifícia Universidade Católica, 2002.)