

CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA DO PRODUTO GRANULADO DE MANGANÊS DE URUCUM

Geraldo Lúcio de Faria¹

Nelson Jannotti Júnior²

Fernando Gabriel da Silva Araújo³

Resumo

Este trabalho estudou importantes parâmetros metalúrgicos do Produto Granulado de Urucum, que são: a degradação granulométrica das partículas a frio e a quente, a decomposição térmica e a eficiência de pré-redução. Uma tonelada do material foi recebida e amostras representativas foram compostas para os procedimentos de caracterização. Para os estudos de decomposição térmica um índice foi proposto: Evolução de Decomposição Térmica (EDT), por meio do qual mapeou-se as reações de decomposição térmica de seus minerais constituintes. Para estudar a redução no estado sólido foram propostos dois parâmetros quantitativos, que são: Eficiência de Pré-redução (EP) e Velocidade Instantânea de Pré-redução (VIP). Por meio deles, observou-se que o minério tem boa redutibilidade no estado sólido. Para a caracterização da degradação granulométrica foram propostos três parâmetros quantitativos: Índice de Desintegração Granulométrica a Frio (DGF), Índice de Crepitação (IC) e Índice de Desintegração Granulométrica a Quente (DGQ). Por meio deles observou-se que este minério não apresenta significativa degradação granulométrica a frio, entretanto ele é susceptível à desintegração a quente.

Palavras-chave: Urucum; Minério de manganês; Degradação granulométrica; Redução.

METALLURGIC CHARACTERIZATION OF AN IMPORTANT BRAZILIAN MANGANESE LUMP ORE

Abstract

This work proposes a study about important metallurgic parameters of Urucum manganese lump ore, which are: cold and hot particle disintegration mechanisms, heat decompositions and the pre-reduction behavior. A tone of the studied ore was received and representative samples were collected for characterization procedures. Aiming to study ore heat decompositions, it was proposed a quantitative index named Evolution of Heat Decomposition (EHD). Using this index, the chemical and mineralogical characterization data, it was possible to determine the main reactions of mineral decomposition. Two quantitative parameters were proposed to describe the ore solid state reduction; these indexes were named Pre-reduction Efficiency (PE) and Pre-reduction Instantaneous Rate (PIR). Applying these parameters it was possible to conclude that Urucum lump ore has a great pre-reduction behavior. The characterization of particle disintegration was performed using three new indexes for manganese ores, which were: Cold Disintegration Index (CDI), Decrementation Index (DI) and Hot Disintegration Index (HDI). These indexes showed that the studied ore did not presents significant cold particle disintegration, but it is susceptible to decrepitation and hot particle disintegration.

Keywords: Urucum; Manganese ore; Particle disintegration; Reduction.

I INTRODUÇÃO

Atualmente a seleção de minérios ou misturas de minérios para a fabricação de ferro-ligas de manganês são feitas com base no restrito conhecimento das suas características químicas e granulométricas. A falta de conhecimento a respeito das propriedades metalúrgicas

desta matéria-prima tem se tornado um problema comum na operação dos fornos metalúrgicos de redução [1-6].

O Produto Granulado de Urucum é um minério valorizado no Brasil como importante matéria-prima para fabricação das ferro-ligas de manganês pelo método

¹Físico, MSc., Dr. Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Demet, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil. E-mail: geraldofaria@demet.em.ufop.br

²Engenheiro metalurgista, Engenheiro, Vale Manganês, Nova Lima, MG, Brasil. E-mail: nelson.jannotti@vale.com

³Físico, MSc., Dr., Professor, Rede Temática em Engenharia de Materiais - Redemat, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil. E-mail: fgabrielaraujo@uol.com.br

do forno elétrico a arco submerso. Uma zona crítica dos fornos elétricos de redução é a de pré-redução ou granular, onde as matérias-primas sólidas experimentam aumento de temperatura à medida que se deslocam em fluxo descendente. A temperatura da carga nesta zona varia, em média, de 500°C a 1.100°C. Nesta região a água, presente na forma de umidade, é evaporada e os óxidos de manganês iniciam sua redução motivada pelo fluxo ascendente de CO. Para que os processos envolvidos nesta zona sejam eficientes é importante que a permeabilidade ao fluxo gasoso seja elevada e homogênea ao longo da carga [1,5,7-10].

Se uma grande quantidade de finos for gerada ou colocada nesta zona, a permeabilidade da carga diminui bruscamente e os gases quentes serão desviados formando alguns canais ao longo da matéria sólida. Nestas condições, a carga não será aquecida homogeneamente, assim como parte da umidade não será retirada, e uma quantidade significativa de óxidos não será pré-reduzida [1,7,8,11].

Segundo Berg e Olsen e Wang e Sundman [9,12], as principais reações de redução dos óxidos de manganês podem ser descritas na seguinte seqüência: na faixa de temperatura entre 600°C e 700°C ocorre uma redução significativa da fase MnO_2 para Mn_2O_3 com uma perda de massa da ordem de 9,2%. Entre 900°C e 1.000°C verifica-se uma significativa redução de Mn_2O_3 para Mn_3O_4 com uma perda de massa da ordem de 3,3%. Ao atingir temperaturas superiores a 1.200°C, que variam em função da matéria-prima e do tipo de liga a ser produzida, a carga, exceção feita ao carbono, amolece e funde [1,9,12,13].

Visando a importância econômica e tecnológica do Produto Granulado de Urucum, associada à falta de conhecimento a respeito das suas características geometalúrgicas, este trabalho propôs uma metodologia experimental que, fazendo uso das mesmas amostras caracterizadas por Faria [2], permitiu caracterizar diferentes parâmetros metalúrgicos do minério: degradação

granulométrica a frio e a quente, evolução de decomposição térmica e eficiência de redução, descrevendo de forma satisfatória o comportamento deste minério na zona granular do reator.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Como já mencionado, o minério utilizado no desenvolvimento deste trabalho foi caracterizado por Faria [2]. As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, as análises químicas e as constituições mineralógicas da amostra global e de faixas granulométricas específicas do Produto Granulado de Urucum.

Para a caracterização da decomposição térmica ao ar e da eficiência de pré-redução, o procedimento de preparação de amostras foi o mesmo, e consistiu em amostrar representativamente 500 g do Produto Granulado na faixa granulométrica compreendida entre 15,9 mm e 9,5 mm (por se aproximar da norma internacional aplicada a minério de ferro e estar compreendida entre 19 mm e 6,3 mm que é considerada uma faixa ótima para operação de fornos elétricos para fabricação ferroligas de manganês). As amostras foram secas a $105 \pm 5^\circ C$ até que sua massa permanecesse constante. Todo o procedimento foi realizado em duplicata para cada tipo de ensaio.

Os estudos de decomposição térmica e de eficiência de pré-redução foram desenvolvidos por meio da submissão das amostras a um aquecimento, da temperatura ambiente até 1.000°C, a uma taxa constante de 25°C/min. O tempo de residência nesta temperatura foi de uma hora. Os ensaios foram realizados em um forno vertical resistivo AN3200, provido de uma termobalança da fabricante Analógica. Para os ensaios de decomposição térmica a atmosfera utilizada foi o ar natural. Entretanto, para os ensaios de eficiência de pré-redução, durante o aquecimento fez-se uso de uma atmosfera constituída por 5 NL/min de 100% de N_2 e durante a isoterma por dife-

Tabela 1. Análise química global e das faixas granulométricas compreendidas entre 19,0 mm e 6,3 mm, e 15,9 mm e 9,5 mm do produto granulado de Urucum (GU) [2]

Amostra	Mn %	Fe %	SiO ₂ %	P %	Al ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	TiO ₂ %
GU (Global)	42,69	13,85	5,67	0,290	2,74	0,290	0,150	0,020
GU (-19,0mm +6,3mm)	32,58	6,92	2,11	0,109	0,780	0,069	0,054	0,082
GU (-15,9mm +9,5mm)	48,60	10,20	0,50	0,196	1,32	0,149	0,054	0,071

Tabela 2. Composição mineralógica da amostra global e das faixas granulométricas compreendidas entre 19,0 mm e 6,3 mm, e 15,9 mm e 9,5 mm do produto granulado de Urucum (GU) [2]

Amostra	Constituintes (% em peso)				
	KMn ₈ O ₁₆ (Criptomelana) MnO ₂ (Pirolusita)	Mn ₆ SiO ₁₂ (Braunita)	Fe ₂ O ₃ (Hematita)	FeO.OH (Goethita)	Outros
GU (Global)	65-55	30-20	16-12	3-1	3-2
GU (-19,0mm +6,3mm)	55-50	25-18	11-8	4-2	3-1
GU (-15,9mm +9,5mm)	70-60	20-10	13-10	5-2	2-1

rentes vazões de 99,5% de CO e 0,5% de N₂ (2 NI/min, 5 NI/min e 15 NI/min).

Por meio da análise química (ICP-OES modelo Ciroc CCD SPECTRO) e da difratometria de raios-X (Difratômetro de Raios-X Panalytical com tubo de Cobre) dos produtos dos ensaios, assim como das perdas de massa observadas durante o aquecimento, determinou-se as temperaturas de início de decomposição das fases menos estáveis e a fração de cada produto das decomposições e das reduções na estrutura final da amostra. É importante ressaltar que cada ensaio foi realizado em duplicata.

Com o objetivo de estudar o comportamento de degradação granulométrica do Produto Granulado de Urucum, este trabalho se propôs a criar uma nova metodologia aplicável a minérios de manganês. Esta proposição consistiu na utilização de três índices quantitativos que possibilitaram caracterizar e entender melhor os principais mecanismos de geração de finos.

O primeiro índice sugerido foi aquele que permitiu avaliar o comportamento mecânico dos materiais a frio, por meio da avaliação de suas resistências ao impacto e à abrasão. Este índice foi definido como: *Desintegração Granulométrica a Frio (DGF)* [1]. A amostra de minério foi, na faixa granulométrica compreendida entre 15,9 mm e 9,5 mm, submetida a uma secagem e seguidamente tamborada (durante 30 minutos em três sequências de 10 minutos) em um tambor rotativo AN4696TR normatizado pela ISO 4696-1 e ISO 4696-2 [14,15]. As porcentagens em massa de material produzidas abaixo das malhas de 9,5 mm, 6,3 mm, 3,35 mm, 1,18 mm, 0,6 mm e 100# da série Tyler forneceram os índices DGF.

O segundo índice avaliou a geração de finos devido à submissão dos materiais a um aquecimento muito rápido. Este índice foi sugerido como o tradicional Índice de Crepitação (IC). A faixa granulométrica selecionada para a determinação deste índice foi a compreendida entre 19 mm e 6,3 mm. Os ensaios foram realizados em um forno tipo mufla da Fornos Lavoisier, modelo 402D. As amostras foram introduzidas na mufla pré-aquecida a 700°C, onde permaneceram durante um intervalo de tempo de 30 minutos. As amostras foram resfriadas ao ar e submetidas a um peneiramento. A partir da média entre dez testes realizados, foram determinados quatro índices de crepitação. Foram eles $I_{-6,3}$, $I_{-3,35}$, $I_{-1,18}$ e $I_{-0,5}$, que dizem respeito às porcentagens em massa de material abaixo de 6,3 mm; 3,35 mm; 1,18 mm e 0,5 mm respectivamente. Três condições foram avaliadas: amostras previamente secas, amostras com umidade de recebimento e isotermicamente tratada a 200°C por 48 horas.

O terceiro índice foi proposto para avaliar o comportamento do material à medida que ele se desloca em fluxo descendente no reator metalúrgico, em contracorrente com um gás já rico em CO, experimentando aumento de temperatura. Este parâmetro foi definido como *Desintegração Granulométrica a Quente (DGQ)* [1]. A faixa granulométrica escolhida para a medida deste índice foi a compreendida entre 15,9 mm e 6,3 mm.

Para a determinação dos índices DGQ, duas alíquotas de 500 g de minério foram individualmente introduzidas em uma retorta de 75 mm de diâmetro e aquecidas em um forno resistivo vertical (normatizados pela ISO para ensaios de RDI e de redutibilidade de minérios de ferro), da temperatura ambiente até 1.000°C, a uma taxa constante de 25°C/min, em atmosfera composta por 100% de N₂ em fluxo ascendente (5 NI/min). Atingida a temperatura de residência, o fluxo de N₂ foi interrompido e a atmosfera redutora em fluxo ascendente foi estabelecida (2 NI/min, 5 NI/min e 15 NI/min de 99,5% de CO e 0,5% de N₂). O tempo de residência nesta temperatura foi de uma hora. Ao término do tempo de residência o fluxo de gás redutor foi interrompido e a amostra foi resfriada no interior do forno sob fluxo ascendente de N₂ (5 NI/min).

Após o resfriamento, as amostras foram submetidas a uma classificação granulométrica nas malhas de 9,5 mm, 6,3 mm, 3,35 mm, 1,18 mm, 0,6 mm e 100# para obtenção dos índices de desintegração granulométrica durante aquecimento em atmosfera redutora sem tamboramento. Uma vez obtidos estes índices, as amostras foram recompostas e tamboradas em um tambor rotativo modelo AN4696TR com frequência de rotação de 30 ± 1 rpm. O tamboramento foi interrompido aos 10 minutos, 20 minutos e 30 minutos de ensaio para determinação de índices de desintegração.

Os produtos dos ensaios de crepitação e de desintegração granulométrica a quente foram caracterizados por meio de microscopia óptica de luz refletida e por picnometria a água.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta as curvas (ensaios realizados em duplicata) de variação da massa em função da temperatura durante aquecimento. A Figura 2 apresenta as perdas

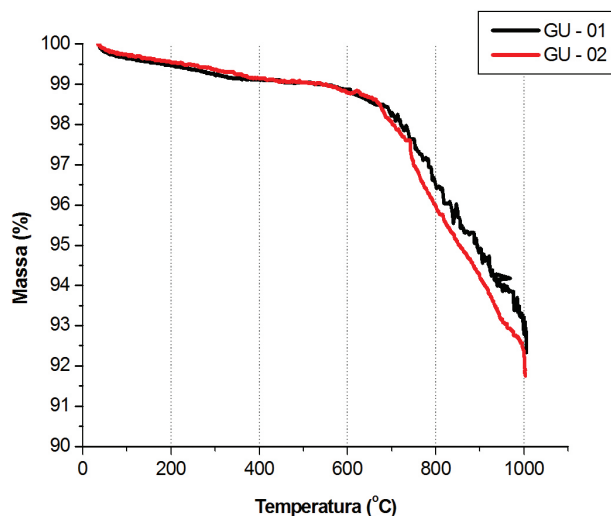


Figura 1. Variação de massa durante o aquecimento ao ar até a temperatura de 1.000°C.

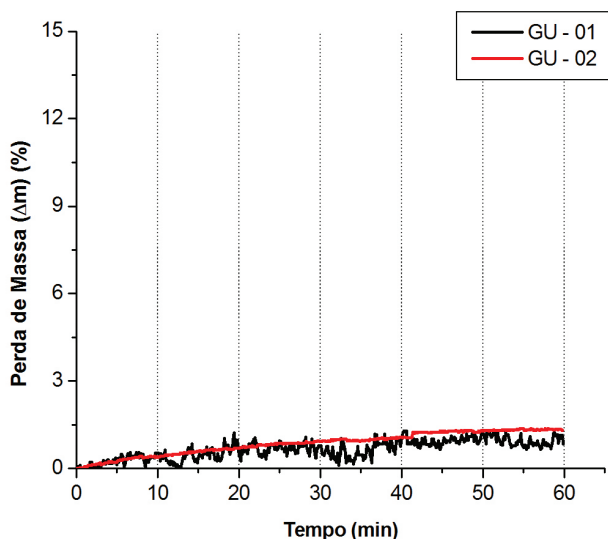


Figura 2. Perda de massa em função do tempo durante isoterma de 1.000°C ao ar.

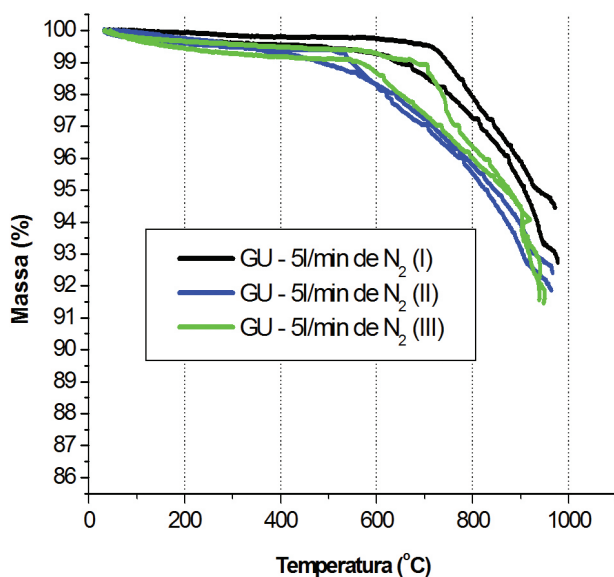


Figura 3. Comparativo entre as variações de massa durante o aquecimento até 1.000°C sob fluxo ascendente de 5 l/min de 100% de N₂.

de massa em função do tempo durante o período de residência isotérmico a 1.000°C.

Pode-se observar que durante o aquecimento das amostras até a temperatura de 1.000°C há uma perda de massa média de 8,0%. Esta perda de massa está associada à decomposição da goethita, dos óxidos e silicato de manganês. Até temperaturas próximas de 500°C tem-se a eliminação da água estrutural, com perda mássica média de 1,0%. A partir das proximidades de 600°C, tem início a decomposição da criptomelana e da pirolusita em Mn₂O₃, que se decompõem completamente até temperaturas próximas de 850°C. Nas proximidades de 700°C tem início a decomposição térmica da braunita, que é completamente

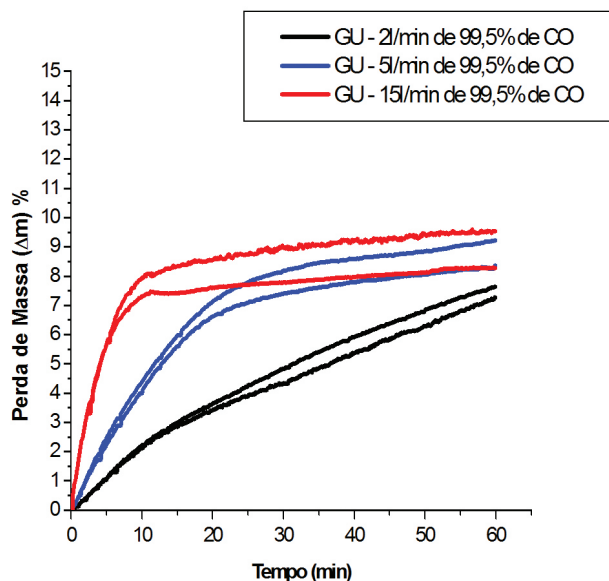


Figura 4. Comparativo entre as perdas de massa durante pré-redução a 1.000°C, sob fluxo ascendente de 99,5% de CO.

consumida até temperaturas próximas de 900°C. Nas proximidades de 950°C observa-se, na curva de aquecimento, um aumento significativo na taxa de decréscimo de massa. Este fato está associado ao início da decomposição térmica do Mn₂O₃ em Mn₃O₄. Até o término do procedimento de aquecimento nem todo Mn₂O₃ se decompôs.

Na Figura 2, pode-se observar que durante a isoterma, ocorreu perda de massa adicional média de apenas 1,2%, conferindo um total médio de 9,1%. Esta perda de massa indica que aproximadamente 80% de todo Mn₂O₃ se decompôs em Mn₃O₄. Observa-se que, na condição estudada, a velocidade de decomposição térmica do Mn₂O₃ em Mn₃O₄ é muito baixa variando entre 1x10⁻³%/min e 1x10⁻⁷%/min em massa. Os resultados obtidos estão de acordo com o que é apresentado na literatura para minérios oxidados de manganês. A eliminação de água estrutural e a decomposição de óxidos de manganês superiores são apontadas como as principais causas da variação de massa durante aquecimento ao ar [1-5,7,8,12].

Este trabalho propõe a utilização do índice *Evolução de Decomposição Térmica (EDT)*, proposto por Faria [2], que medirá o estágio de decomposição térmica do minério submetido ao ciclo térmico de aquecimento e isoterma de uma hora ao ar (1.000°C). Para o Produto Granulado de Urucum, o valor encontrado do índice EDT foi de 96,6%. Segundo alguns autores, as decomposições podem ser totais ou parciais a depender da temperatura máxima, da taxa de aquecimento e das características químicas e físicas do minério, como por exemplo presença de elementos químicos que alterem a estabilidade das fases e porosidade [1,7,9,12]. Pode-se afirmar que o Produto Granulado de Urucum possui elevada eficiência de decomposição

térmica, pois 96,6% das reações esperadas foram concluídas.

A Figura 3 apresenta as curvas de aquecimento, em atmosfera inerte (5 NI/min de 100% de N_2), dos pares de amostras do Produto Granulado de Urucum (GU) que foram submetidos aos ensaios de pré-redução. Destaca-se que os pares identificados pelos algarismos romanos I, II e III, dizem respeito àqueles que foram posteriormente submetidos à uma hora de isoterma a $1000^\circ C$, sob fluxos ascendentes de 99,5% de CO, com vazões de 2 NI/min, 5 NI/min e 15 NI/min respectivamente.

Pode-se observar que existem pequenas diferenças entre cada uma das curvas de aquecimento. Estas variações estão diretamente associadas às alterações das proporções minerais presentes em cada amostra e não ao efeito do gás. Observa-se ainda que estas curvas são muito semelhantes às curvas de decomposição térmica ao ar. A literatura relata que isto era esperado, pois apesar da pressão parcial de oxigênio ter sido significativamente alterada, a decomposição térmica dos óxidos de manganês

até Mn_3O_4 não é significativamente alterada na faixa de temperatura estudada [5,9,12].

Após alcançada a temperatura de $1.000^\circ C$, cada um dos pares foi submetido à isoterma sob fluxo ascendente do gás composto por 99,5% de CO. A Figura 4 apresenta as perdas de massa em função do tempo de isoterma. Pode-se observar que a vazão do gás redutor influencia diretamente no comportamento de pré-redução do Produto Granulado de Urucum. De forma geral, quanto maior a vazão do gás, maior a velocidade de pré-redução. Pode-se afirmar que quanto maior a vazão do gás redutor, maior a disponibilidade de CO para promover a redução do Mn_3O_4 (que era estável ao ar e em atmosfera de N_2 a $1.000^\circ C$) para MnO, acelerando assim a cinética de transformação de fases [9].

Por meio da submissão dos produtos de decomposição térmica e de pré-redução a procedimentos de caracterização química e mineralógica, foi possível propor um modelo comparativo entre as frações de cada constituinte, tomando por referência a amostra natural. A Figura 5 apresenta este comparativo.

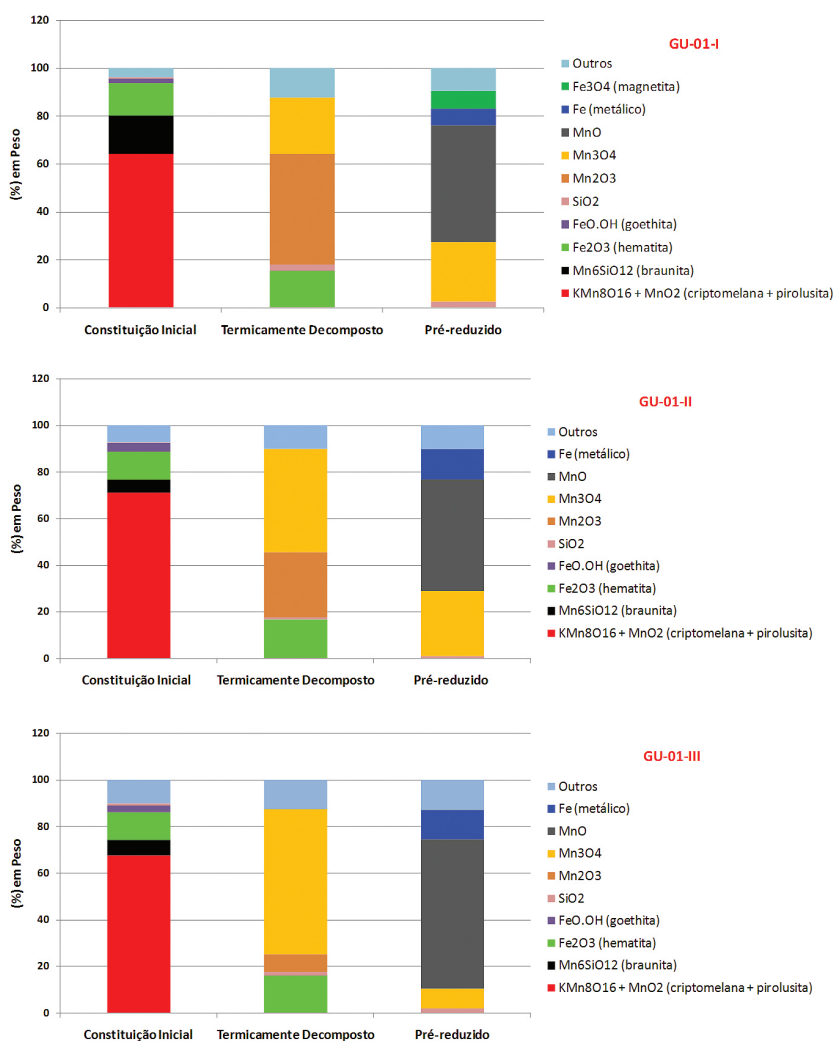


Figura 5. Evolução das constituições das amostras GU-01-I, GU-01-II e GU-01-III, naturais, termicamente decompostas e pré-reduzidas.

Por meio da aplicação da proposta de Faria [2], foi possível calcular para toda a isoterma os valores de *Eficiência de Pré-Redução (EP)*. A Figura 6 apresenta as curvas que caracterizam este parâmetro. Pode-se observar que a vazão do gás exerce forte influência sobre este índice. Quanto maior a vazão utilizada, maiores os valores de EP para um instante de tempo bem determinado.

Aplicando também a proposta de Faria [2], foi possível calcular para toda a isoterma, o índice *Velocidade Instantânea de Pré-redução (VIP)*. A Figura 7 apresenta um comparativo entre as taxas variacionais temporais (VIP) da eficiência de pré-redução. Observa-se que a amostra GU-01-I, reduzida com 2 NI/min de 99,5% de CO, apresenta o menor valor médio inicial de VIP (2%/min), seguido pela GU-01-II, reduzida com 5 NI/min (4,9%/min). O

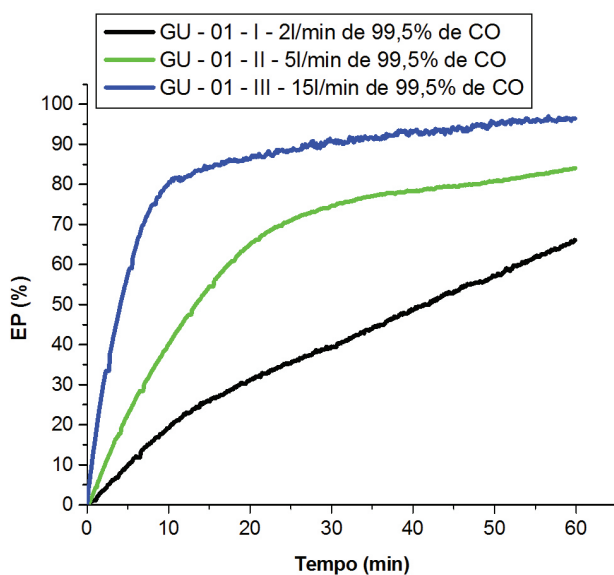


Figura 6. Comparativo entre os índices Eficiência de Pré-redução (EP) das amostras GU-01-I, GU-01-II, GU-01-III.

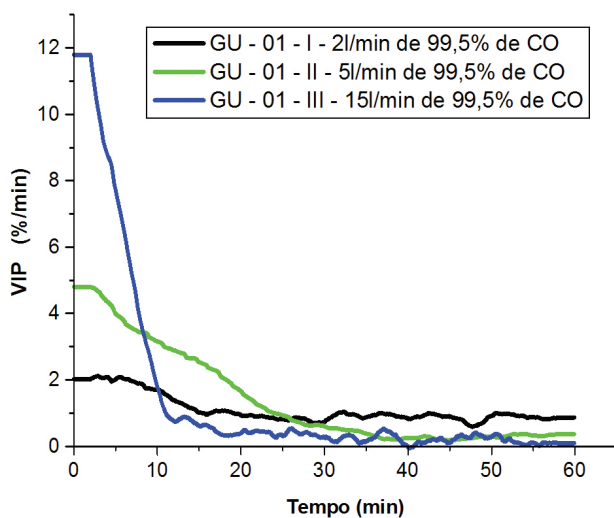


Figura 7. Comparativo entre os índices Velocidade Instantânea de Pré-redução (VIP) das amostras GU-01-I, GU-01-II, GU-01-III.

maior valor inicial de VIP foi apresentado pela amostra GU-01-III, reduzida com 15 NI/min (11,9%/min).

A degradação granulométrica do minério foi inicialmente avaliada por meio do índice DGF que está apresentado na Figura 8. Pode-se observar que para as condições de tamboramento estudadas, o Produto Granulado de Urucum possui pouca susceptibilidade à geração de finos, apresentando, após trinta minutos de tamboramento, apenas 0,56% de material passante na malha de 6,3 mm.

Uma vez conhecido o comportamento de degradação granulométrica a frio, o conhecimento da geração de finos devido ao aquecimento rápido do minério foi investigado. A Figura 9 apresenta os índices de crepitação medidos para o produto Granulado de Urucum seco, com umidade de recebimento e tratado termicamente a 200°C por 48 horas.

Observa-se que a amostra úmida de GU apresentou um índice de crepitação de 16%, na malha de 6,3 mm. Após o procedimento de secagem, o índice obtido foi de 10%, resultando em um decréscimo de 37,5%. Pode-se, portanto, afirmar que a secagem do minério granulado de Urucum (GU) tem participação de 37,5% no decréscimo da crepitação. A amostra de GU tratada termicamente apresentou índice de crepitação de 4%, com uma redução, também de 37,5% em relação à amostra úmida. Os índices de crepitação obtidos para o minério em estudo são considerados baixos quando comparados à minérios de ferro hematíticos, porém são elevados quando comparados a outros minérios de manganês do Brasil [7].

As Figuras 10 e 11 são histogramas que comparam os índices de desintegração granulométrica a frio (DGF), com os índices de desintegração granulométrica durante aquecimento (DGQ) ao ar, e durante pré-redução sob

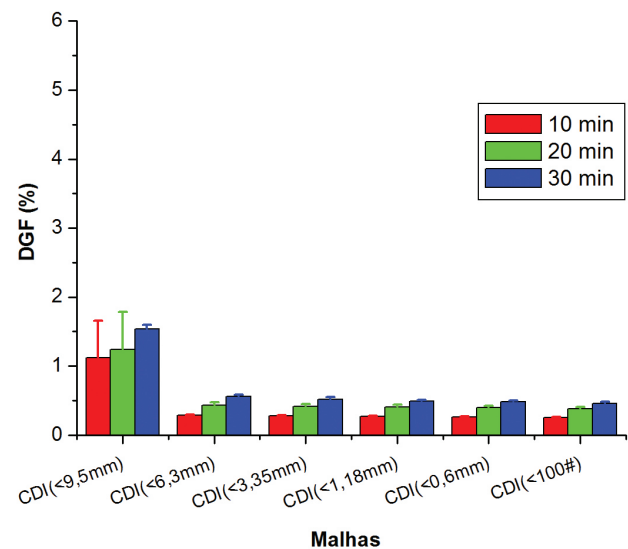


Figura 8. Índices de Desintegração Granulométrica a Frio (DGF) do Produto Granulado de Urucum.

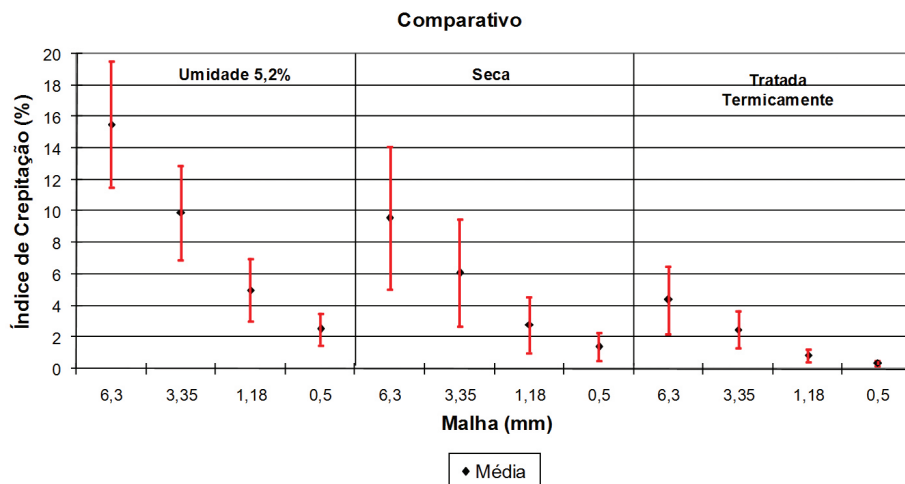


Figura 9. Índices de Crepitação Medidos para o Produto Granulado de Urucum.

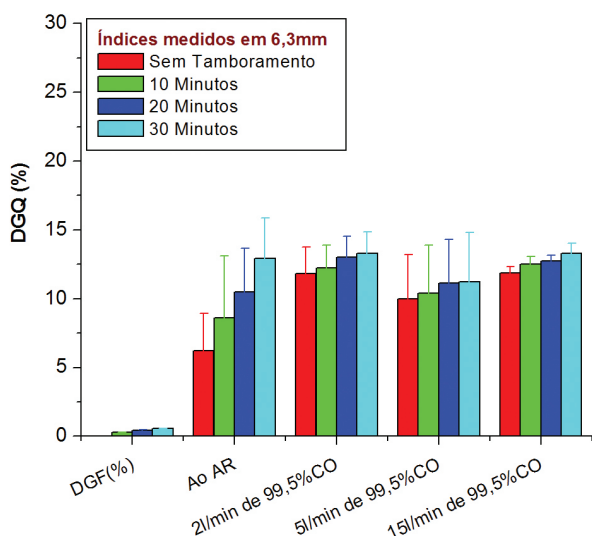


Figura 10. Comparativo entre índices DGF e DGQ medidos na malha de 6,3mm para amostras do Produto Granulado de Urucum.

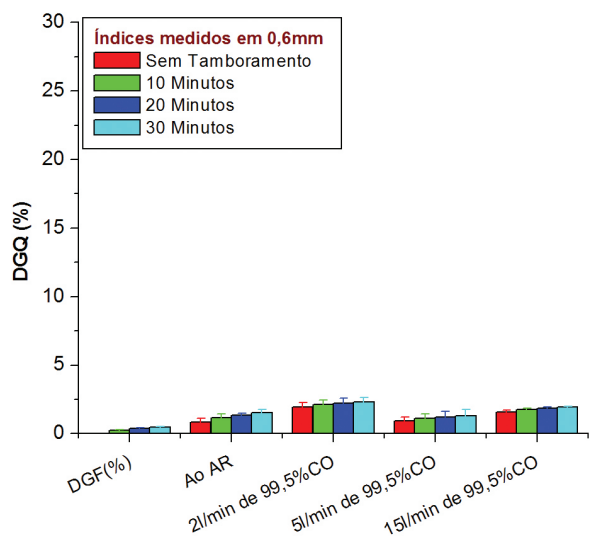


Figura 11. Comparativo entre índices DGF e DGQ medidos na malha de 0,6mm para amostras do Produto Granulado de Urucum.

fluxo ascendente de 2 NI/min, 5 NI/min e 15 NI/min de 99,5% de CO, medidos nas malhas de 6,3 mm e 0,6 mm respectivamente.

Observa-se que os índices diminuem à medida que se usam malhas mais finas para medi-los. É importante notar que os ciclos térmicos que mais degradaram o Produto Granulado de Urucum sem tamboramento, foram as pré-reduções sob fluxos de 2 NI/min, 5 NI/min e 15 NI/min de 99,5%CO, não existindo diferenças significativas entre eles.

A desintegração granulométrica do Produto Granulado de Urucum durante aquecimento em atmosfera oxidante pode estar associada à eliminação de água estrutural, à presença de tensões induzidas nas partículas e ao início das decomposições térmicas dos óxidos de manganês.

4 CONCLUSÕES

Nos estudos de decomposição térmica, as perdas de massa nas amostras estudadas estão relacionadas às decomposições térmicas das fases constituintes. Conclui-se que a eliminação da água estrutural, a decomposição da criptomelana e da pirolusita em Mn_2O_3 , a decomposição térmica da braunita e a decomposição térmica do Mn_2O_3 em Mn_3O_4 são as principais transformações de fase que acontecem ao ar. A evolução de decomposição térmica do Produto Granulado de Urucum nas condições estudadas foi elevada (96,6% de EDT).

A redução no estado sólido do minério estudado é fortemente influenciada pela vazão de gás redutor. Em linhas gerais, o Produto Granulado de Urucum apresenta boa redutibilidade no estado sólido. As maiores eficiências de pré-redução foram obtidas para a vazão de 15 NI/min de 99,5% de CO (96% de EP).

As velocidades iniciais de pré-redução são consideradas elevadas, sendo as maiores também verificadas para a vazão de 15 NI/min de 99,5% de CO (11,9%/min

em massa). O principal produto da redução no estado sólido do minério estudado é a fase MnO com estrutura da manganosita.

O Produto Granulado de Urucum apresenta baixa susceptibilidade à degradação granulométrica a frio (0,56% abaixo de 6,3 mm). Entretanto, ele apresenta elevada susceptibilidade à crepitação quando úmido (15,5%) e seco (9,8%). Um tratamento térmico prévio da amostra a 200°C por 48 h atuou reduzindo o índice de crepitação (4%).

As principais causas para a degradação granulométrica a quente do Produto Granulado de Urucum estão

associadas à eliminação de água estrutural, às tensões internas provenientes do processamento do minério, às transformações de fase da criptomelana e pirolusita em Mn₂O₃ e conseqüentemente à do Mn₂O₃ em Mn₃O₄ e não à transformação do Mn₃O₄ em MnO.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Capes pelo suporte financeiro e a Vale Manganês por ceder gentilmente as amostras.

REFERÊNCIAS

- 1 Faria GL, Tenório JAS, Jannotti N, Araújo FGS. Disintegration on heating of a Brazilian manganese lump ore. *International Journal of Mineral Processing*. 2013;124:132-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2013.06.008>
- 2 Faria GL. Estudo geometalúrgico de granulados e pelota de minério de manganês [tese]. Ouro Preto: REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto; 2011. p. 302.
- 3 Faria GL, Reis EL, Jannotti N, Araújo FGS. caracterização química, física e mineralógica do produto granulado de manganês proveniente da Mina do Azul. *Matéria*. 2012;17:901-908.
- 4 Faria GL, Reis EL, Jannotti N, Araújo FGS. Estudo quantitativo de decomposição térmica dos principais produtos granulados de minério de manganês do Brasil. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 67º Congresso Anual da ABM; 2012; Rio de Janeiro, Brasil. São Paulo: ABM; 2012.
- 5 Olsen SE, Tangstad M, Lindstad T. Production of ferromanganese alloys in the submerged arc furnace. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag; 2007. p. 247.
- 6 Walde DHG, Gierth E, Leonardos H. Stratigraphy and mineralogy of the manganese ores of Urucum, Mato Grosso. *Geologische Rundschau*. 1981;70(3):1077-85. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01820182>
- 7 Faria GL, Jannotti N, Araújo FGS. Decrepitation behavior of manganese lump ores. *International Journal of Mineral Processing*. 2012;102:150-155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2011.10.004>
- 8 Faria GL, Vianna NCS, Jannotti N, Vieira CB, Araujo FGS. Decrepitation of Brazilian manganese lump ores. In: Proceedings of 12th International Ferroalloys Congress - INFACON XII; 2010; Helsinque, Finlândia. Helsinque: INFACON; 2010.
- 9 Berg KL, Olsen SE. Kinetics of manganese ore reduction by carbon monoxide. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2000;31B:477-490.
- 10 Tangstad, M, Calvert P, Brun H, Lindseth AG. Use of comilog ore in ferromanganese production. In: Proceedings of 10th International Ferroalloys Congress - INFACON X; 2004; Cape Town, South Africa. Helsinque: INFACON; 2004. p.213-222.
- 11 Yoshikoshi H, Takeuchi O, Miyashita T, Kuwana T, Kishikawa K. Development of composite cold pellet for silico-manganese production. In: Proceedings of 105th ISIJ Meeting; 1983; Tokyo, Japan. Tokyo: ISIJ; 1983.
- 12 Wang M, Sundman B. Thermodynamic assessment of the Mn-O system. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1992;23B:821-831.
- 13 Zaki MI, Hasan MA, Pasupulety LE, Kumari K. Thermochemistry of manganese oxides in reactive gas atmospheres: Probing redox composition in the decomposition course MnO₂ → MnO. *Thermochimica Acta*. 1997;303:171-181. [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6031\(97\)00258-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6031(97)00258-X)
- 14 International Organization for Standardization. ISO4696-1:Iron ores for blast furnace feedstocks - Determination of low-temperature reduction-disintegration indices by static method - Part 1: Reduction with CO, CO₂, H₂ and N₂. Geneva: ISO; 2007.
- 15 International Organization for Standardization. ISO4696-2: Iron ores for blast furnace feedstocks - Determination of low-temperature reduction-disintegration indices by static method - Part 2: Reduction with CO and N₂. Geneva: ISO; 2007.

Recebido em: 22/10/2013

Aceito em: 27/02/2014