

# ESTUDO DA REDUÇÃO CARBOTÉRMICA DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

Gabriella Mattar<sup>1</sup>; Edmilson Renato de Castro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluna de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

<sup>2</sup> Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

**Resumo.** *Este estudo teve como objetivo principal estudar a taxa de reação do rejeito de minério de ferro proveniente de processos de mineração, em processo de redução carbotérmica, visando reduzir significativamente os rejeitos descartados em barragens. Para alcançar este objetivo foram realizadas análises de teor de ferro para o rejeito e do teor de carbono fixo para o redutor carvão vegetal. Também se caracterizou a composição granulométrica do rejeito. As pelotas autorredutoras foram preparadas em proporção estequiométrica. O teor médio de ferro no rejeito foi de 59,31 % e de carbono fixo no carvão vegetal 77,93 %. De acordo com a distribuição granulométrica dos finos do rejeito do minério de ferro, o diâmetro médio das partículas encontrado foi de 0,29 mm e a taxa de reação atingiu 100 % de redução carbotérmica após 6 minutos de ensaio.*

## Introdução

Os rejeitos de minério de ferro (*Iron Ore Tailings - IOT*) configuram-se como um dos maiores desafios da indústria de mineração no Brasil e no mundo. Subprodutos do processo de beneficiamento do minério de ferro, esses resíduos são compostos predominantemente por areia, água e minerais diversos. Apenas no Brasil gera-se por ano, em média, 129 milhões de toneladas desses rejeitos (Tunes; Vasconcelos, 2023). Devido à baixa atratividade econômica e ausência de incentivos para o desenvolvimento de tecnologias de reaproveitamento, esses materiais são majoritariamente destinados a barragens de contenção.

Apesar de amplamente utilizadas, as barragens de rejeitos, erguidas em camadas sobrepostas do material, apresentam riscos expressivos quando a manutenção e o monitoramento não são conduzidos de forma adequada. Os desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), ambos em Minas Gerais, evidenciaram as consequências ambientais, sociais e econômicas de falhas estruturais nesses sistemas. Mesmo diante desse cenário, relatórios de 2025 da Agência Nacional de Mineração (ANM) indicam que no Brasil existem atualmente 101 barragens armazenando resíduos de mineração em situação de alerta ou emergência declarada, reforçando a urgência por alternativas para a destinação e utilização desses rejeitos.

Diante dessa demanda, um dos métodos interessantes sob o ponto de vista ambiental para a reutilização e revalorização desses rejeitos de minério de ferro, é promover um processo siderúrgico conhecido como redução carbotérmica. Basicamente, esse processo consiste em reduzir a ferro metálico, o óxido de ferro presente no rejeito na presença de carbono em altas temperaturas. Uma das formas de se utilizar o carbono como redutor é através de pelotas autorredutoras, constituídas de minério de ferro e carvão vegetal. Para que a reação ocorra, é necessário o fornecimento de energia térmica, obtida por fontes como resistências elétricas, gás natural e até mesmo micro-ondas (Castro, et al, 2009).

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho foi caracterizar teor de ferro do rejeito de minério de ferro (IOT), de caracterizar o teor de carbono fixo do redutor carbonáceo carvão vegetal e determinar a taxa de reação deste rejeito em equipamento adaptado para esta finalidade.

## Materiais e Métodos

### Rejeito de minério de ferro (Iron Ore Tailings - IOT)

Material fornecido por empresa do setor de beneficiamento de minério de ferro. Antes das caracterizações físicas, 500 g deste material foi seco em estufa a 105°C por 4 horas, os grumos formados foram desfeitos por um sistema de moagem manual, pestilo e almofariz, e o pó armazenado em pote hermeticamente fechado. A Figura 1 apresenta o rejeito de minério de ferro em seu estado natural (aspecto de lama) antes do processo de secagem.

Figura 1 – Rejeito de minério de ferro “in natura”.



### Carvão vegetal

A composição do material é 100 % da espécie eucalipto. E também antes das caracterizações físicas, o material foi moído manualmente através do conjunto pestilo e almofariz, inserido em uma cápsula de porcelana, seco por 24 horas, no interior de um dessecador preenchido com sílica gel e o pó produzido foi posteriormente armazenado em pote hermeticamente fechado.

### Carboxi metil celulose

Este material teve como função ligar as partículas do carvão vegetal e do resíduo de minério de ferro na produção das pelotas autorredutoras.

### Determinação da composição granulométrica do rejeito de minério de ferro e do carvão vegetal

A metodologia completa dessa caracterização encontra-se na norma ABNT NM-248. De forma resumida, uma amostra seca, de aproximadamente 300 g, foi colocada sobre a peneira superior do conjunto, procurando evitar a formação de uma camada espessa de material sobre qualquer uma das peneiras. Em seguida, procedeu-se ao peneiramento, utilizando um conjunto de peneiras com aberturas *Mesh* (número de aberturas por polegada linear na malha metálica da peneira) 4, 8, 14, 28, 48, 100 e 150, dispostas em ordem decrescente de abertura, com tampa e fundo. Promoveu-se a agitação mecânica do conjunto, por um tempo razoável para permitir a separação e classificação prévia dos diferentes tamanhos de grãos da amostra. Para o cálculo do diâmetro médio de Sauter, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$d_{ps} = 1/\sum(x_i/d_i) \quad (1)$$

$x_i$  = massa retida sobre a massa total da amostra;

$d_i$  = diâmetro médio de abertura da peneira.

A Figura 2 apresenta o agitador de peneiras granulométrico.

Figura 2 - Agitador de peneiras granulométrico.



#### Determinação do teor de ferro do rejeito de minério de ferro

Pesou-se em balança analítica com precisão de 0,1 mg, uma amostra de rejeito de minério de ferro isento de água. A massa da amostra para análise não deve ser inferior 0,2500 e nem superior a  $0,3000 \pm 0,1$  g. A amostra foi transferida quantitativamente para um Erlenmeyer de 750 ml que continha 20 mL de solução de ácido clorídrico (HCl) 6N. Aqueceu-se brandamente até ataque completo e concentrou-se a solução a poucos mililitros. Adicionou-se, à fervura, gota a gota da solução de cloreto de estanho ( $\text{SnCl}_2$ ) até desaparecer a cor amarela d do ferro ( $\text{Fe}^{3+}$ ) e uma gota a mais. Após resfriamento, diluiu-se a 10 mL com água destilada, e adicionou-se 10 mL de cloreto de mercúrio ( $\text{HgCl}_2$ ), agitando por 1 minuto. Após este período de agitação verificou-se que ocorreu a precipitação de sólido branco. Após alguns minutos adicionou-se a solução com precipitado, 200 mL de água destilada e 20 mL de solução de Zimmerman. Esta solução foi titulada a frio, vagarosamente, com solução 0,1 N de  $\text{KMnO}_4$  até a viragem para coloração rosa persistente. Anotou-se o volume (V) consumido da solução de  $\text{KMnO}_4$ . Para os cálculos da quantidade de ferro presente na amostra, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$\%Fe = (V \times f \times 0,005585 \times 100)/m \quad (2)$$

1 mL de  $\text{KMnO}_4$  0,1 N corresponde a 0,005585 g de ferro (Fe);

$f$  = fator de correção da solução de  $\text{KMnO}_4$ ;

$m$  = massa da amostra de rejeito de minério de ferro;

#### Determinação do teor de carbono fixo do carvão vegetal

O teor de carbono fixo ( $CF$ ) é uma medida indireta e pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad (3)$$

$CZ$  = teor de cinzas, em %;

$MV$  = teor de matérias voláteis, em %.

Para determinar estes teores, cinzas (CZ) e matérias voláteis (MV), utilizou-se a norma ABNT-NBR 8112 – Carvão vegetal – Análise Imediata.

#### Produção das pelotas autorreduutoras

As pelotas autorreduutoras produzidas na proporção estequiométrica, de acordo com as equações 3 e 4.



A primeira etapa de produção das pelotas consistiu em uma pesagem precisa, em bêquer e balança semi analítica, das quantidades estequiométricas, calculadas entre os reagentes, rejeito de minério de ferro (81,59%), carvão vegetal (18,41%) e do aglomerante carboxi metil celulose (0,5%). A mistura obtida entre estes pós foi transferida para um frasco plástico, de 2 L com tampa, para a homogeneização manual, com o objetivo de obter uma mistura homogênea entre os componentes. Transferiu-se esta mistura para uma cápsula de porcelana, com aproximadamente 20% em água da massa total, a fim de realizar a ligação intergranular entre os componentes. A pelotização também foi manual. As pelotas produzidas, foram colocadas em uma travessa de vidro e permaneceram por 24 horas secando ao ar para evitar que trincassem. Após esta secagem inicial foram transferidas para a estufa a 110°C, sem convecção, por mais 24 horas. Resfriadas em dessecador com dessecante sílica gel, as pelotas foram raspadas, até alcançarem 15 mm de diâmetro em média, com o objetivo de uniformizar a geometria e o tamanho das amostras. Por fim, as pelotas foram acondicionadas e armazenadas até os ensaios no mesmo dessecador com dessecante sílica gel utilizado anteriormente. A Figura 3 apresenta pelotas autorreduutoras produzidas.

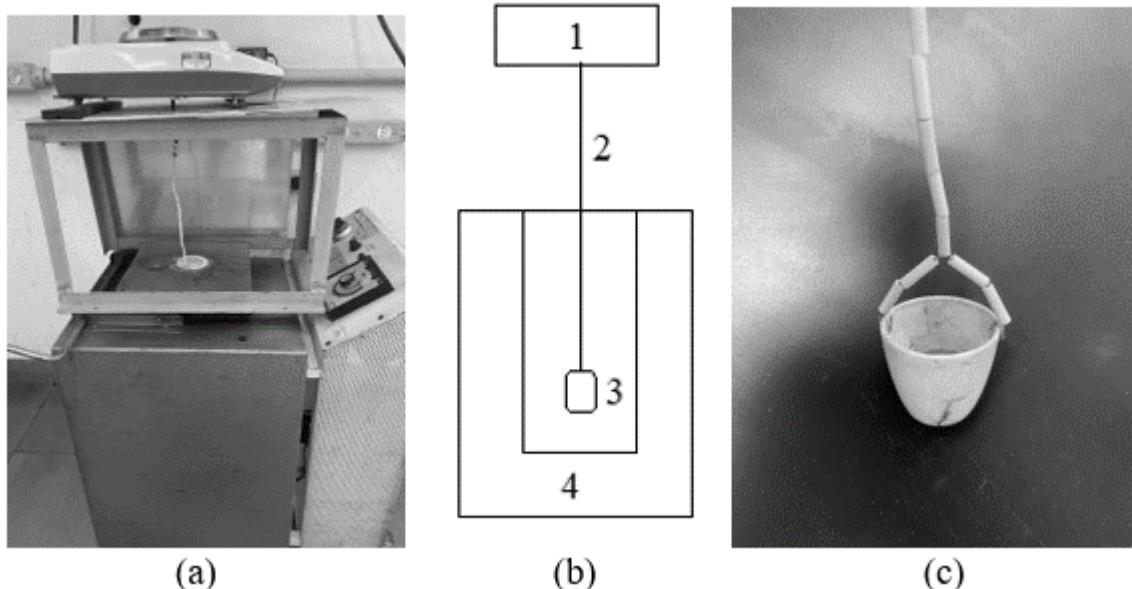
Figura 3 – Pelotas autorreduutoras de 15 mm de diâmetro.



#### Ensaios experimentais de redução carbotérmica das pelotas autorreduutoras

Para a realização destes ensaios de redução carbotérmica, adaptou-se um forno mufla para esta finalidade. Basicamente, o forno foi colocado em posição vertical, com sua porta voltada para a parte superior e instalada uma balança semi analítica, com apoio de um suporte metálico, na parte superior deste forno. O sistema que controlou a perda de massa das pelotas consistiu em um cadrinho de porcelana de 30 mL, acoplado a parte inferior da balança semi analítica através de um fio metálico níquel-cromo, conforme apresentado pela Figura 4.

Figura 4 – Esquema adaptado para ensaios de redução carbotérmica. (a) Vista frontal da montagem do protótipo; (b) Desenho esquemático, 1 – Balança semi-analítica, 2 – Fio níquel cromo revestido por missangas cerâmicas, 3 – Cadinho de porcelana de 30 mL e 4 – Forno mufla; (c) Vista do conjunto cadinho de porcelana e fio níquel-cromo revestido com missangas cerâmicas.



Foram realizados ensaios com uma pelota e a temperatura na ordem de  $1150 \pm 25^{\circ}\text{C}$ .

A taxa de reação é definida como sendo a porcentagem do material reagido e foi determinado pela perda de peso. O cálculo da quantidade de material que reagiu durante cada experimento realizado foi efetuado empregando-se a seguinte equação:

$$\%TR = [(M_i - M_t)/(M_i \times M)] \times 100 \quad (6)$$

Onde:

$TR$  = Taxa de reação (%)

$M_i$  = Peso inicial da amostra (g)

$M_t$  = Peso no instante  $t$ ; (g)

$M$  = Porcentagem máxima de perda de peso (35%)

## Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta os resultados do teor de ferro do rejeito de minério de ferro e a Tabela 2 apresenta os resultados da análise imediata do carvão vegetal.

Tabela 1 – Teor de ferro no rejeito de minério de ferro (%p).

Amostras	Teor de ferro
1	59,31
2	59,07
3	59,31
4	59,56
<b>Média</b>	<b>59,31</b>

O teor de ferro médio das amostras do rejeito de minério de ferro foi de 59,31 %p Fe. Segundo Gomes et al (2011), o resultado da quantificação do teor de ferro presente em finos,

estocado em barragem como rejeito proveniente do tratamento de minério de ferro foi de 48,08 %p. Esta discrepância de valores percentuais pode estar relacionada com sua concentração, isto é, o rejeito analisado neste trabalho é proveniente da concentração de minério de ferro durante seu beneficiamento e ainda não tinha sido transferido para uma barragem.

Tabela 2 - Análise imediata do carvão vegetal (%p).

<b>Amostras</b>	<b>Matéria volátil</b>	<b>Cinzas</b>	<b>Carbono fixo</b>
1	20,84	1,35	77,81
2	20,69	1,26	78,05
<b>Média</b>	<b>20,77</b>	<b>1,31</b>	<b>77,93</b>

O carbono fixo é o componente predominante do carvão vegetal e a média encontrada nas amostras foram de 77,93%. Segundo Santos et al. (2011), a faixa desejada de carbono fixo no carvão vegetal para uso siderúrgico está compreendida entre 75% e 80%.

A Tabela 3 apresenta os resultados, em ensaios em duplicata, para determinação da composição granulométrica de rejeito de minério de ferro.

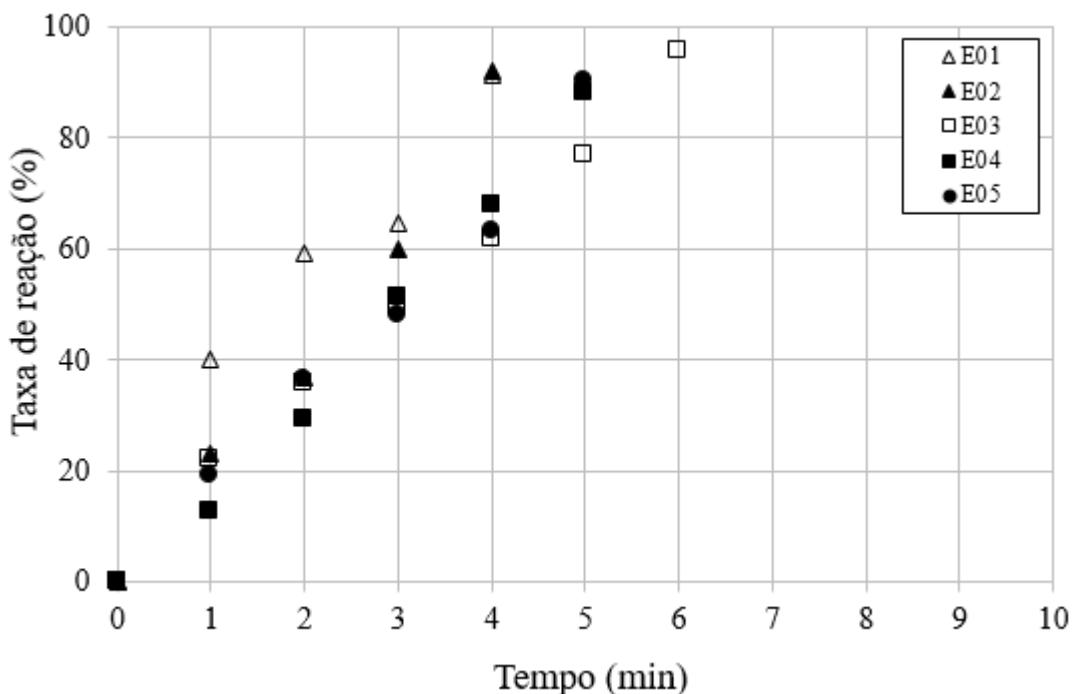
Tabela 3 – Análise da composição granulométrica do rejeito de minério de ferro.

<b>Peneiras (Mesh)</b>	<b><math>d_z</math> (mm)</b>	<b>Amostra 1:</b> $x_i(\%)$	<b>Amostra 2:</b> $x_i(\%)$
14	1,780	4,89	4,61
28	0,890	20,70	21,94
48	0,450	35,82	30,84
100	0,225	26,29	27,69
150	0,128	8,81	8,75
200	0,090	1,81	2,69
250	0,068	1,34	2,47
Fundo	0,062	0,09	0,43

O diâmetro médio de partículas encontrado para a primeira amostra foi 0,301 mm e para a segunda amostra 0,278 mm, resultando em um diâmetro médio de 0,290 mm. Rejeitos quando são de granulometria fina, são denominados lamas, e quando de granulometria grossa (acima de 0,074 mm), são denominados rejeitos granulares (Espósito, 2000). Esta análise da distribuição granulométrica de partículas de rejeito de minério de ferro mostrou que 1,43 % possuem granulometria inferior a 0,074 mm, considerado como lama e o restante, 98,57 % como rejeito granular. Esta variação na distribuição de tamanho das partículas é em função do tipo do método de beneficiamento adotado e do tipo minério e seriam uma indicação de geologia inerente às diferentes regiões e das propriedades das jazidas e do material, além do processo de esmagamento e compactação que os resíduos sofrem enquanto quebram.

A Figura 5 apresenta os resultados da taxa de reação em função do tempo para cinco ensaios em forno aquecido por resistências elétricas em uma temperatura média de 1150°C com uma pelota por experimento. Os dados das medidas contínuas de perda de massa foram matematicamente tratados (Eq.6), para calcular a eficiência do processo de redução do rejeito de minério de ferro. As taxas de reação apresentam a evolução da reação muito similares e atingindo 100% de redução em apenas 6 minutos.

Figura 5 - Taxa de reação em função do tempo para 1 pelota.



## Conclusões

O estudo demonstrou ser possível utilizar resíduo de minério de ferro para fins siderúrgicos, especificamente na redução carbotérmica dos óxidos metálicos presentes na composição do resíduo. Este resultado com certeza contribuirá quanto aos aspectos econômicos, sociais e ambientais, reduzindo o desperdício de matéria prima e incentivando a utilização sustentável. Demonstra ainda uma alternativa concreta de revalorização para um material que, quando disposto em barragens, representa um notório e persistente risco socioambiental para o país.

## Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). *Relatório mensal: barragens de mineração – janeiro de 2025*. Brasília, DF: ANM, 2025. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/>. Acesso em: 28 out. 2025.

CARVALHO JÚNIOR, I. P. de. *Estudo da utilização de energia de microondas na redução de minério de ferro por carbono na forma de pelotas auto-redutoras*. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-18122001-143418/publico/tde.pdf>. Acesso em: 12 out. 2025.

CASTRO, E.R.; MOURÃO, M.B.; JERMOLOVICIUS, L.A.; SENISE J.T.; TAKANO, C. *Forno aprimorado para estudo de processos de redução carbotérmica de minérios incentivada por micro-ondas*. Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, vol 5, nº 3, p.156 - 161, 2009.

GOMES, M.A.; PEREIRA, C.A., PERES, A.E.C.; *Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro*. Mineração. Vol. 64(2), p.233 – 236, 2011.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M. de.; CARDOSO, M. T. *Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto*. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 39, nº. 90, p. 221-230, 2011.

TUNES, S.; VASCONCELOS, Y. *O desafio dos rejeitos. Revista Pesquisa FAPESP*, n. 339, p. 73–75, 2023.