

## INFLUÊNCIA DA POROSIDADE NA QUALIDADE DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO\*

*Darlan Vale Bayão<sup>1</sup>  
Rubén Antonio Llobell Solé<sup>2</sup>  
Jefferson Januário Mendes<sup>3</sup>  
Fernando Leopoldo von Krüger<sup>4</sup>  
Paulo Santos Assis<sup>5</sup>*

### Resumo

As pelotas de minério de ferro, juntamente com o sinter e o granulado constituem a carga metálica do alto-forno e são utilizadas como matérias-primas para a produção de ferro gusa. Diante da escassez do granulado e, conseqüentemente, com o aumento da demanda por pelotas, as empresas de pelletização necessitam intensificar seus investimentos em P&D, buscando cada vez mais a otimização da qualidade das pelotas e o aumento da produtividade de suas plantas. Por isso é de suma importância manter as especificações adequadas para o processo, avaliando a qualidade das pelotas a partir das suas propriedades físicas, químicas, metalúrgicas e microestruturais. Desse modo, o objetivo desse estudo foi verificar a influência da porosidade na qualidade de pelotas de minério de ferro, especialmente na resistência a compressão e no índice de redutibilidade. Para tal, foi utilizada a técnica de picnometria a hélio para uma análise semi-quantitativa da porosidade e, adicionalmente, a microscopia óptica e de microscopia eletrônica de varredura como técnicas complementares para uma análise qualitativa da porosidade. Os testes para determinação do índice de redutibilidade foram realizados de acordo com a norma ISO 7215. Por fim, os experimentos para determinação da resistência a compressão das pelotas foram realizados conforme a norma ISO 4700. Resultados evidenciaram uma estreita correlação entre a porosidade e o índice de redutibilidade e também entre a porosidade e resistência à compressão das pelotas. Concluiu-se que a porosidade é um parâmetro que deve ser bem controlado durante o processo, pois tal propriedade possui forte influência no índice de redutibilidade e na resistência à compressão, que são fatores críticos para a qualidade final das pelotas.

**Palavras-chave:** Pelotas de minério de ferro; Porosidade; Resistência à compressão; Índice de redutibilidade

### INFLUENCE OF POROSITY IN THE QUALITY OF IRON ORE PELLETS

#### Abstract

Iron ore pellets, together with sinter and granulate, constitute the metallic burden of the blast furnace and are used as raw materials for the production of pig iron. Faced with the scarcity of granulate and, consequently, with the increase of the demand for pellets, pelletizing companies need to intensify their investments in R&D, progressively seeking the optimization of the quality of pellets and the increase of the productivity of your plants. Therefore, it is very important to maintain adequate specifications for the process, evaluating the quality of the pellets based on their physical, chemical, metallurgical and microstructural properties. Thus, the aim of this study was to verify the influence of porosity in the quality of iron ore pellets, especially in the compression strength and the reducibility index (RI). For this, the helium pycnometry technique was used for a quantitative analysis of porosity and, additionally, optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) as complementary techniques for a qualitative analysis of porosity. The tests to

\* Contribuição técnica ao 48º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 6º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 04 de outubro de 2018, São Paulo, SP, Brasil.

determine the RI were carried out in accordance with the international standard ISO 7215. Finally, the experiments for determination of compressive strength of the pellets were performed according to international standard ISO 4700. Results showed a close correlation between porosity and RI and also between porosity and compressive strength of the pellets. It was concluded that porosity is a parameter that should be well controlled during the process, since such property has a strong influence on the RI and compressive strength, which are critical factors for the final quality of the pellets.

**Keywords:** Iron ore pellets; Porosity; Compressive strength; Reducibility index

- <sup>1</sup> *Mestrando em Engenharia de Materiais (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG), Especialista em Gestão da Qualidade integrada ao Meio Ambiente (PUC Minas), Graduado em Engenharia Metalúrgica (UFOP), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
- <sup>2</sup> *Engenheiro Químico, Dr., Gerente de Projetos de Pesquisa, Departamento de Pesquisa em Engenharia e Educação Continuada (DEPEC), Fundação Gorceix (FG), Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*
- <sup>3</sup> *Engenheiro de Produção, MSc., Professor Associado, Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), Congonhas, Minas Gerais, Brasil*
- <sup>4</sup> *Engenheiro Metalurgista, Dr., Consultor, Departamento de Pesquisa em Engenharia e Educação Continuada (DEPEC), Fundação Gorceix (FG), Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*
- <sup>5</sup> *Engenheiro Metalurgista, Dr-Ing., Professor Titular, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Professor Permanente; Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT); DEMET, UFOP-UEMG, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

A pelota de minério de ferro (produzida a partir de finos de minério de ferro) é um material largamente utilizado na alimentação de reatores de redução e oferece alta qualidade para a produção de aço em altos-fornos (AFs) assim como para processos de redução direta. Atualmente a indústria siderúrgica vem exigindo progressivamente melhores qualidades das pelotas e, devido a tal fato, um grande número de métodos de testes vem sendo utilizados em escala industrial para a avaliação das características físicas e metalúrgicas das pelotas. Afim de fornecer o minério de ferro para siderúrgicas as mineradoras necessitam atender uma série de especificações de qualidade de matérias primas, dentre elas qualidades químicas, físicas e metalúrgicas a serem utilizadas na produção do aço[1].

Para pelotas, sinter e granulados as rotas mais utilizadas para a produção de aço são duas, conforme a Figura 1:

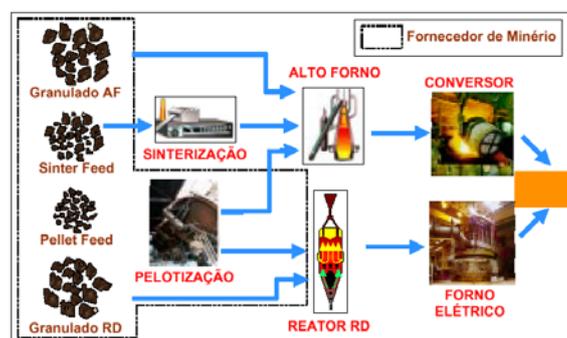


Figura 1. Fluxograma do minério de ferro na indústria siderúrgica

Fonte: Adaptado de [1]

O AF pode ser carregado com os três tipos de minério de ferro: o minério granulado e os outros dois (sinter e pelota), estes produzidos a partir de processos de aglomeração. O minério granulado é natural e é proveniente da indústria mineradora, possuindo uma certa faixa granulométrica (entre 25mm e 6mm) antes de ir para o reator de redução. A pelota, que também é proveniente da indústria mineradora, é produzida a partir do *pellet feed* que possui uma faixa granulométrica (<0,15 mm), onde, para se obter boas características físicas, químicas, metalúrgicas e granulométricas antes de ir para o reator de redução, é necessário passar por um processo de aglomeração conhecido como pelotização. O sinter, por sua vez, é produzido na própria indústria siderúrgica, onde é produzido a partir do *sinter feed* que possui uma certa faixa granulométrica (entre 6,35mm e 0,15mm) onde passa por um processo de aglomeração denominado sinterização, para possuir boas características físicas, químicas, metalúrgicas e granulométricas antes de ir para o reator de redução. Sendo assim a qualidade do aglomerado de minério de ferro desempenha um papel vital no consumo do agente redutor e na produtividade do AF e também no reator de redução direta. Na maior parte das siderúrgicas integradas a mistura de carga para AF é decidida conforme a disponibilidade de minério granulado, sinter e pelotas. Recentemente tem-se dado maior atenção para o uso de pelotas em AF, principalmente devido a sua boa resistência, redutibilidade, e características de amolecimento e fusão e também de inchamento[1].

As pelotas sofrem alterações substanciais na estrutura física que ocorrem durante a redução dos óxidos de ferro dependendo de suas propriedades e das condições do processo, por isso é necessário o conhecimento dos parâmetros estruturais para a descrição do processo de redução. A Figura 2 mostra as zonas do

AF onde as principais propriedades relacionadas a qualidade das pelotas são colocadas à prova.

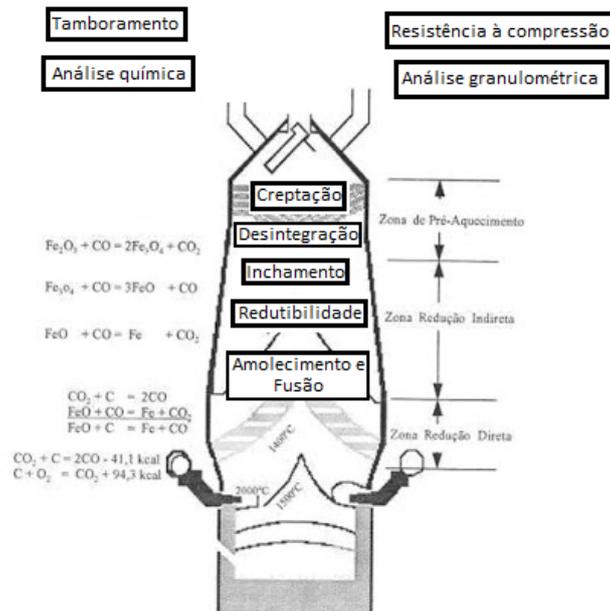


Figura 2. Zonas do AF onde as propriedades das pelotas são colocadas à prova.  
Fonte: Adaptado de[1]

A qualidade das pelotas de minério de ferro é um parâmetro de suma importância e pode ser determinada pelas propriedades da mistura da pelletização e pelas condições de calor e queima e é avaliada com base nos seguintes índices: composição química, microestrutura, propriedades físicas (ex.: resistência à compressão, porosidade) e metalúrgicas (ex.: índice de redutibilidade). Geralmente, a qualidade das pelotas é influenciada pela natureza do minério ou concentrado, e pela interação entre os constituintes e os aditivos tais como: óxido de ferro e ganga associada, tipo e quantidade de fundentes adicionados, carbono e o seu posterior tratamento para produzir as pelotas, pois essas interações resultam na formação das várias fases mineralógicas[2].

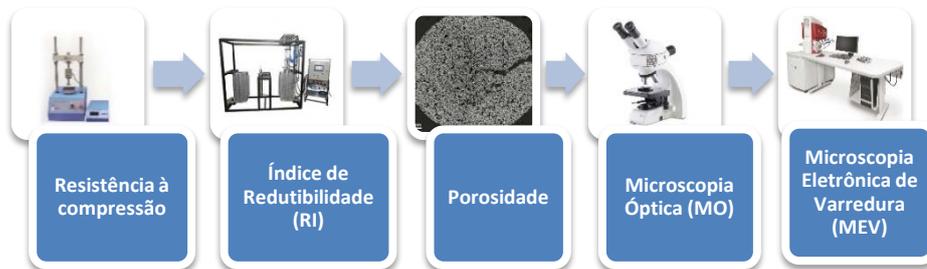
Correlação entre os parâmetros que caracterizam a estrutura física e as propriedades metalúrgicas da pelota tais como porosidade, resistência à compressão e redutibilidade das pelotas vêm frequentemente sendo encontradas e se tornando cada vez mais importantes em diversas situações práticas. Devido a tal fato, o objetivo desse estudo foi verificar a influência da porosidade na qualidade das pelotas de minério de ferro.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais e Métodos

As pelotas utilizadas neste trabalho foram fornecidas por empresas da área de mineração, nas quais solicitamos serviços de caracterização e de avaliação da qualidade de seus produtos para a Fundação Gorceix (FG).

Neste estudo foram avaliados 20 lotes de pelotas provenientes de diferentes empresas. A metodologia utilizada para avaliar a qualidade e a caracterização microestrutural das pelotas neste trabalho está apresentado pelo fluxograma mostrado na Figura 3:



**Figura 3.** Fluxograma da metodologia utilizada para avaliação da qualidade das pelotas de minério de ferro.

Os testes para avaliação das propriedades físicas (porosidade e resistência à compressão) e metalúrgicas (índice de redutibilidade) foram realizados no Laboratório de Aglomeração e Redutibilidade do Departamento de Pesquisa em Engenharia e Educação Continuada (DEPEC) em conjunto com o Departamento de Tecnologia em Mineração e Metalurgia (DETEMM) e também no Centro de Treinamento e Transferência de Tecnologia (CT<sup>3</sup>) da FG. Já a microscopia óptica e a microscopia eletrônica de varredura foram realizadas no NanoLab da Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT) e do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (EM-UFOP).

Deve-se destacar que foram avaliados o RI, a porosidade e a resistência à compressão das pelotas devido ao fato dessas variáveis possuírem uma grande influência na produtividade do AF.

### 2.1.1 – Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão torna possível a avaliação da integridade física das pelotas nas etapas de manuseio, isto é, durante a estocagem e o transporte.

O teste tem como objetivo avaliar a resistência à compressão das pelotas de minério de ferro que foram submetidas ao processo de queima. Tal ensaio é destrutivo e tem seu valor representado pela média aritmética dos valores individuais de cada pelota de cada um dos 20 lotes, seu resultado é expresso em kgf/pelota.

Para a determinação da resistência à compressão das pelotas foi utilizado como referência a norma internacional ISO 4700[3].

Foram testadas 10 pelotas escolhidas aleatoriamente de cada um dos 20 lotes estudados para se ter um resultado mais bem representado estatisticamente. O teste foi conduzido pela máquina de resistência à compressão da marca BREMEN, do Laboratório de Aglomeração e Redutibilidade do DEPEC–DETEMM mostrado na Figura 4.



**Figura 4.** Máquina utilizada para determinação da resistência à compressão das pelotas  
É importante mencionar que o valor de referência (valor ótimo) para que uma pelota possua uma boa resistência à compressão é maior ou igual a 300 kgf/pelota.

### 2.1.2. Índice de Redução – *Reduction Index (RI)*

O ensaio torna possível a avaliação da extensão na qual o oxigênio pode ser removido de minérios de ferro quando reduzidos sob condições semelhantes aquelas que prevalecem na zona de redução de um AF.

Este ensaio tem como objetivo avaliar o RI das pelotas de minério de ferro (queimadas). O ensaio tem seu valor representado como uma porcentagem em massa.

Os ensaios foram realizados em um forno da marca FORTLAB modelo FTRED-1000/CLP com 9000W, 220V-trifásico e com 3 zonas de aquecimento (Figura 5) equipado com uma balança que permite que a perda em massa da porção de ensaio seja lida a qualquer momento durante o ensaio, uma retorta de redução e um sistema para fornecimento de gases e regulação das vazões.



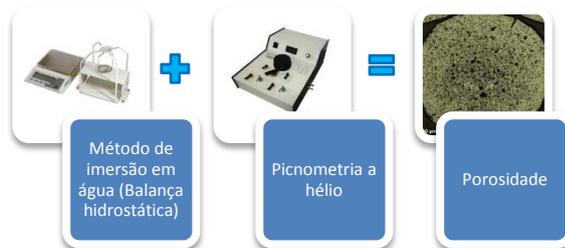
**Figura 5.**–Forno FORTLAB modelo FTRED-1000/CLP utilizado na realização dos testes de RI.

Para a execução do ensaio e a determinação do RI foi utilizada como referência a norma internacional ISO 7215 [4].

É importante mencionar que os ensaios foram realizados em triplicata para que o resultado final fosse estatisticamente melhor representado a partir da média aritmética dos valores encontrados. Além disso, é importante ressaltar também que o valor de referência (valor ótimo) do RI para pelotas de AF é  $RI > 60\%$ .

### 2.1.3 Porosidade

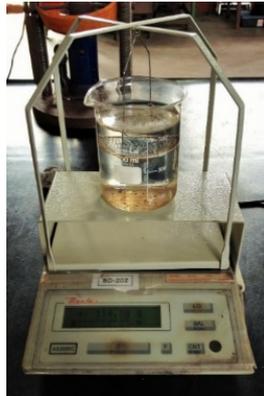
A porosidade das pelotas de minério de ferro é obtida através dos resultados de dois métodos, que são eles: método de imersão em água (balança hidrostática) e o picnometria a hélio, conforme mostrado na Figura 6.



**Figura 6.** Métodos utilizados para encontrar os parâmetros que auxiliam o cálculo da porosidade das pelotas.

### 2.1.3.1. Método de imersão em água

O volume das pelotas da porção do ensaio foi medido à temperatura ambiente utilizando o método de imersão em água, segundo o princípio de Arquimedes, que tem como princípio a determinação do volume aparente (volume de fluido deslocado) das pelotas ( $V_{ap}$ ) e as massas das amostras obtidas no ar e na água após encharcar com água os poros abertos das pelotas usando uma balança de precisão para pesagem hidrostática (Figura 7).



**Figura 7.** Balança hidrostática.

### 2.1.3.2. Picnometria a hélio

Este ensaio tem como objetivo avaliar a densidade real ( $d_r$ ) das pelotas de minério de ferro. Para a determinação da porosidade das pelotas de minério de ferro estudadas neste trabalho foi utilizada uma norma interna do Laboratório de Aglomeração e Redutibilidade do DEPEC-DETEMM. Os equipamentos utilizados para os ensaios foram: um picnômetro a hélio (*Multipycnometer*) da marca Quantachrome Instruments (Figura 8), possuindo três células de diferentes tamanhos, esferas para calibração do aparelho e gás hélio.



Figura 8. Picnômetro a hélio

Para a realização do ensaio foi separada uma certa quantidade (aproximadamente 4 pelotas) de cada um dos 20 lotes estudados, compreendendo aproximadamente o volume de 2/3 da célula *small* do picnômetro a hélio.

O volume das pelotas foi encontrado a partir do picnômetro e em seguida foram calculadas as densidades real e aparente das pelotas, obtidas a partir do picnômetro e do balança hidrostática, respectivamente.

E, finalmente, a porosidade foi encontrada a partir da Equação 1:

$$\text{Porosidade} = \frac{d_r - d_{ap}}{d_r} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

- $d_r$  é a densidade real obtida através do picnômetro;
- $d_{ap}$  é a densidade aparente obtida através da balança hidrostática;

É importante mencionar que os ensaios do método de imersão em água e o de picnometria a hélio foram realizados em triplicata para que o resultado final fosse melhor representado estatisticamente a partir da média aritmética dos valores encontrados. Além disso, é importante ressaltar também que a porosidade depende de vários fatores tais como basicidade, porcentagem de antracito, tipo de minério, etc. seu valor de referência (valor ótimo) pode variar entre 25 e 30%.

#### 2.1.4. Resumo dos valores de referência das propriedades físicas e metalúrgicas das pelotas para AF avaliadas neste trabalho.

Após conhecidos todos os valores de referência (valores ótimos), um resumo de tais valores é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo dos valores de referência das propriedades físicas e metalúrgicas das pelotas de minério de ferro avaliadas neste trabalho

Valores de referência das propriedades das pelotas para AF	
Propriedade	Valor de referência
RI	>60%
Resistência à compressão	≥300(kgf/pelota)
Porosidade	25 a 30%.

#### 2.1.5. Microscopia

### 2.1.5.1. Microscopia Ótica

As amostras estudadas no presente trabalho foram analisadas por um microscópio ótico(MO) da marcaLEICA, modelo DMR pertencente ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) e à REDEMAT da EM-UFOP.

Para a análise da microestrutura das pelotas, a partir da técnica de microscopia ótica,as mesmas foram submetidas ao procedimento descrito a seguir: embutimento a frio; desbaste com carbureto de silício; polimento com alumina; análise microscópica; processamento e aquisição de imagens.

### 2.1.5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

As amostras estudadas no presente trabalho foram analisadas por um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca TESCAN modeloMIRA3-FEG-LM no NanoLab da REDEMAT/DEMET da EM-UFOP.

Para a análise da microestrutura das pelotas, a partir da técnica de microscopia eletrônica de varredura, as mesmas foram submetidas aoseguinte procedimento: embutimento a frio; lixamento (passando pelas lixas de 200mm até 600mm); polimento (alumina 1 $\mu$ m); vaporização ao carbono, onde se deposita uma fina camada de grafitesobre a superfície da amostra espessura de 200 a 300Å, pois as pelotas não são condutoras; análise ao MEV; processamento e aquisição de imagens a partir dos detectores de elétrons retroespalhados – *backscatteredelectrons*(BSE) (que mostra as informações sobre a composição, onde as diferenças entre números atômicos médios das fases são enfatizadas) e os detectores de elétrons secundários – *secondaryelectrons*(SE) (que mostra informações sobre a tipologia, onde as diferenças de relevo são enfatizadas);

## 2.2.Resultados

### 2.2.1. Resultados dos testes de RI, resistência à compressão e porosidade

A Figura 9 (a), (b) e (c) mostra os resultados dos testes de RI, resistência à compressão e porosidade das pelotas, com seus desvios padrões, respectivamente.Também está evidenciado na Figura 9 (linhas vermelhas tracejadas) o valor de referência de cada um dos parâmetros avaliados, conforme apresentado na Tabela 1.

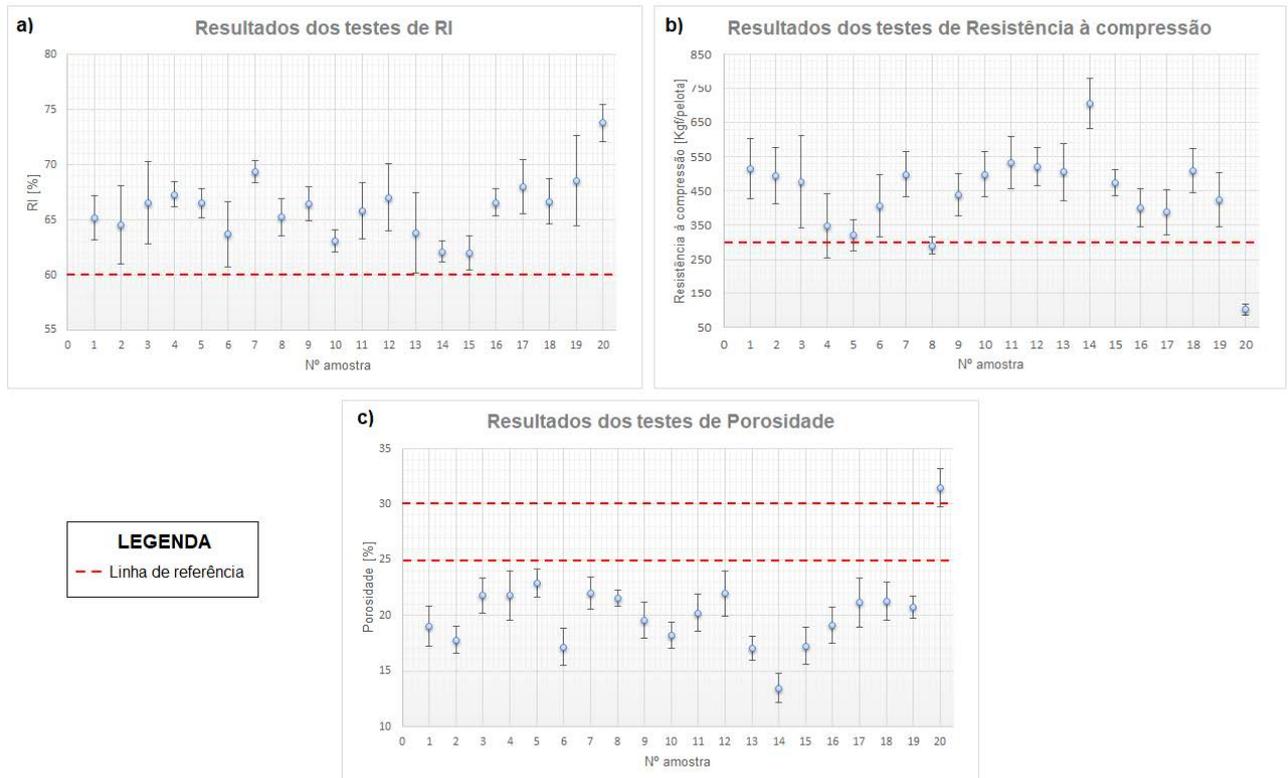


Figura 9. Resultados dos testes de (a) RI, (b) resistência à compressão(c) e porosidade.

### 2.2.2. Resultados das correlações entre as propriedades (físicas e metalúrgicas) que descrevem a qualidade das pelotas avaliadas

A Figura 10(a) e (b) apresenta as correlações entre a porosidade e as propriedades físicas e metalúrgicas (RI e resistência à compressão) evidenciando também o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que é definido como uma medida da proporção da variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade da outra [5].

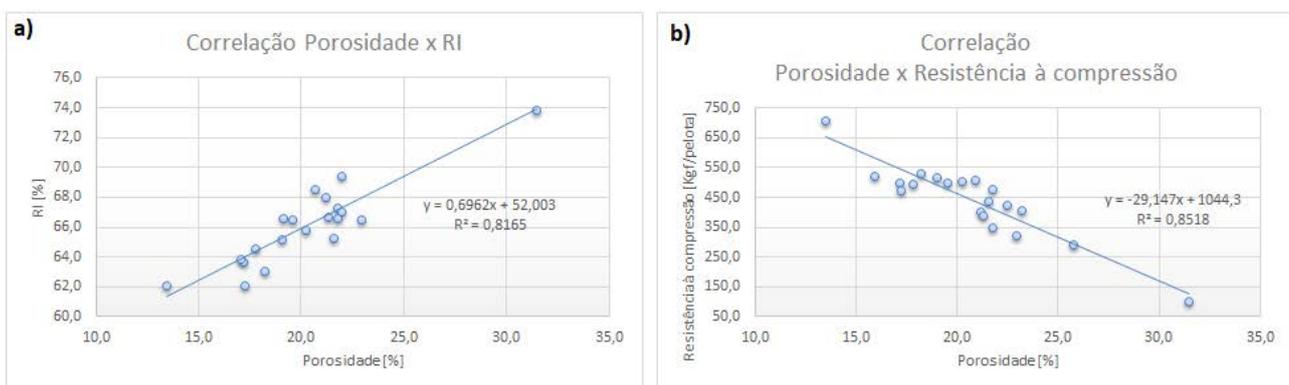


Figura 10. Resultados das correlações: (a) Porosidade x RI e (b) Porosidade x Resistência à compressão das pelotas.

É importante mencionar aqui que o  $R^2$  pode variar entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Se as variáveis  $x$  e  $y$  estão relacionadas linearmente na forma direta,  $R^2 = 1$ ; se as variáveis  $x$  e  $y$  estão relacionadas linearmente na forma inversa,  $R^2 = -1$ ; se as variáveis  $x$  e  $y$  são independentes,  $R^2 = 0$ . Além disso, quanto mais próximo de 1 o

valor absoluto de  $R^2$ , mais perfeito o grau de correlação linear entre as variáveis  $x$  e  $y$  e quanto mais próximo de 0 o valor absoluto de  $R^2$ , maior o grau de flutuação independente das variáveis ou maior o grau de não-linearidade da dependência funcional entre  $x$  e  $y$  [5].

É importante apontar também, que tais propriedades mencionadas acima são parâmetros que descrevem a qualidade final das pelotas.

### 2.2.3. Resultado das análises microscópicas (MO e MEV)

A Figura 11 (a) expõe, a partir da MO, a visão geral das fases e principalmente a porosidade da pelota. A Figura 11 (b) mostra o detalhe das fases presentes na pelota (hematita, magnetita, escória), os poros e diversos grãos em processo de coalescimento (sinterização) devido à alta temperatura durante o processo de queima que as pelotas são submetidas durante o processo de produção.

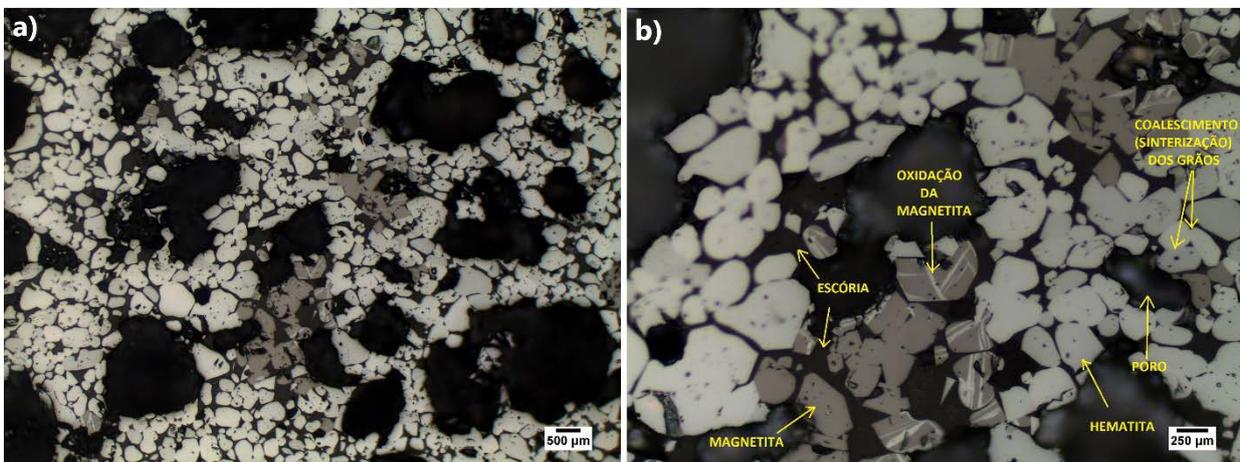


Figura 11.–Microscopia óptica com aumento de (a) 20x e (b) 50x

A Figura 12 indica, a partir do MEV, a visão geral da porosidade de uma pelota analisada a partir dos detectores de elétrons retroespalhados de elétrons secundários.

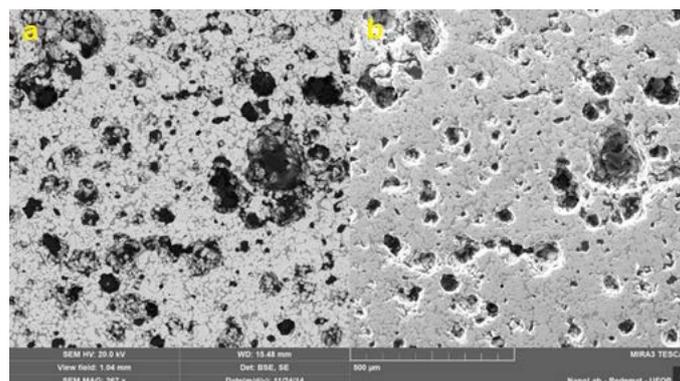


Figura 12. Imagens das pelotas geradas pelos detectores de BSE (a) e SE (b) do MEV (aumento de 200x)

A Figura 13 aponta claramente, a partir do MEV, os detalhes da morfologia dos grãos, da formação da escória, da porosidade e também dos diversos grãos em processo de coalescimento (sinterização) devido à alta temperatura durante a queima das pelotas a partir dos detectores de BSE (a) e SE (b) do equipamento.

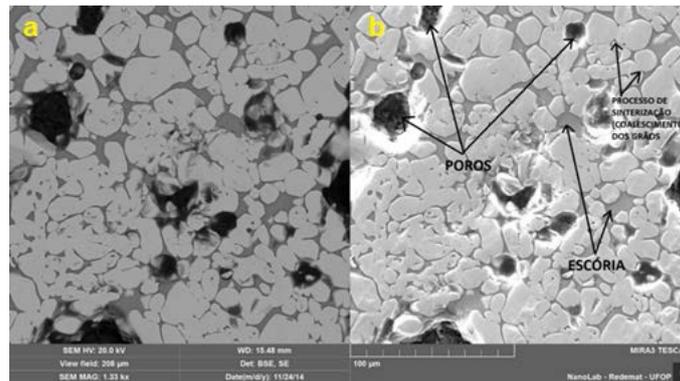


Figura 13. Imagens das pelotas geradas pelos detectores de BSE (a) e SE (b) do MEV (aumento de 1000x)

### 2.3. Discussão

Foi encontrada uma boa correlação entre a porosidade e o RI da pelota com um valor de  $R^2 = 0,8165$  (81,65%), mostrado na Figura 10 (a). Tal resultado pode ser explicado devido ao fato de que, quanto maior a porosidade da pelota, maior é a área de contato entre o gás redutor (CO) e a parede dos poros presentes na pelota e, conseqüentemente, maior a redução destas dentro do reator de redução. Tal fato condiz com os estudos de Chun, Zhu e Pan (2011) [6] que constataram que o RI é diretamente proporcional à quantidade de poros (porosidade) que, segundo os autores, eram formados devido à remoção de enxofre na forma de  $SO_2$  do interior das pelotas produzindo, além de poros, trincas em seu interior.

Conforme mostrado na Figura 10 (b) nota-se que também foi encontrada uma boa correlação entre a porosidade e a resistência a compressão das pelotas, com o valor de  $R^2 = 0,8518$  (85,18%). Tal fato pode ser explicado devido aos poros serem concentradores de tensões que, como consequência, resultam em trincas internas e provocam uma queda brusca na resistência a compressão das pelotas. Tal resultado está de acordo com os estudos de Chun, Zhu e Pan (2011) [6] que observaram que a resistência à compressão das pelotas diminui com o aumento do teor de enxofre na matéria prima da pelota, devido ao fato de que mais de 95% de enxofre ser removido na forma de  $SO_2$  nas etapas de pré-aquecimento e queima das pelotas, e em consequência de tal fato são produzidos poros e trincas quando o  $SO_2$  é removido do interior das pelotas, levando a baixa resistência à compressão das mesmas. Tal correlação encontrada também corrobora com os estudos de Dwarapudi et al. (2010) [7] que observaram que a porosidade da pelota decrescia enquanto sua resistência a compressão aumentava com adição de piroxenas pelotas. E finalmente, coincidindo com os estudos de Umadevi et al. (2008) [8] os quais observaram que altos valores de resistência a compressão são atribuídos à baixa porosidade, baixa quantidade de magnetita e alta quantidade de hematita, além de que, poros muito esticados (morfologia que contribui com concentração de tensões em suas pontas) e trincas resultam em uma queda drástica na resistência à compressão.

### 3 CONCLUSÃO

Este estudo possibilitou identificar a influência que a porosidade possui na qualidade final nas pelotas de minério de ferro. Através da análise dos resultados obtidos neste trabalho foi possível concluir que:

- Quanto maior a quantidade de poros (porosidade) da pelota, maior é a área de contato entre o gás redutor (CO) e a parede dos poros presentes na pelota e, conseqüentemente, maior a redução (RI) destas, em concordância com o coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,8165$ ) encontrado no presente trabalho;
- A resistência diminui com o aumento da porosidade;isto é explicado devido ao fato de que os poros atuam como concentradores de tensão que resultam em trincas internas e provocam uma queda brusca na resistência à compressão das pelotas, conforme a correlação ( $R^2 = 0,8518$ ) encontrada no presente estudo;

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da FG, o Laboratório de Aglomeração e Redutibilidade do DEPEC-DETEMM, o CT<sup>3</sup>, a REDEMAT/DEMET e a EM-UFOP, em especial ao laboratório NanoLab e seus colaboradores.

## REFERÊNCIAS

- 1 CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO ESPÍRITO SANTO. Especificação e caracterizações de minério de ferro para alto forno. Vitória, s/d.
- 2 UMADEVI, T. et al. Influence of pellet basicity (CaO/SiO<sub>2</sub>) on iron ore pellet properties and microstructure. ISIJ International. 2011; 51(1), 14-20
- 3 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 4700: Iron ore pellets: determination of crushing strength. Geneva: ISO; 1996.
- 4 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7215: Iron ores for blast furnace feedstocks:determination of the reducibility by the final degree of reduction index. Geneva: ISO; 2007.
- 5 SCHWAAB, M.; PINTO, J.C. Análise de dados experimentais - Volume I: fundamentos de estatística e estimação de parâmetros. Rio de Janeiro: E-papers; 2007.
- 6 CHUN, T.; ZHU, D.; PAN, J. Influence of sulfur content in raw materials on oxidized pellets. Journal of Central South University of Technology. 2011; 18(6): 1924-1929.
- 7 DWARAPUDI, S. et al. Effect of pyroxenite flux on the quality and microstructure of hematite pellets. International Journal of Mineral Processing. 2010; 96(1-4): 45-53.
- 8 UMADEVI, T. et al. Investigation of factors affecting pellet strength in straight grate induration machine. Ironmaking & Steelmaking. 2008; 35(5): 321-326.