

Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica

Cláudio Batista Vieira

Dr.Sc., Prof. da REDEMAT (UFOP/UEMG/CETEC) e do Departamento de Eng. Metalúrgica e de Materiais da Escola de Minas da UFOP. E-mail: ufop@terra.com.br

Carlos Alberto Rosière

Dr. rer. nat., Prof. do Departamento de Geologia do IGC da UFMG. E-mail: crosiere@dedalus.lcc.ufmg.br

Eloisio Queiroz Pena

M.Sc., Prof. do Departamento de Eng. Metalúrgica e de Materiais da Escola de Minas da UFOP. E-mail: eloisio@em.ufop.br

Varadarajan Seshadri

Dr. Ing., Prof. do Departamento de Eng. Metalúrgica e de Materiais da UFMG. E-mail: seshadri@demet.ufmg.br

Paulo Santos Assis

Dr. Ing. Prof. da REDEMAT (UFOP/UEMG/CETEC) e do Departamento de Eng. Metalúrgica e de Materiais da Escola de Minas da UFOP. E-mail: assis@em.ufop.br

Resumo

Esse artigo apresenta uma análise crítica da metodologia empregada para avaliação técnica rotineira de finos de minérios de ferro para sinterização, tanto por parte das siderúrgicas, quanto pelas minerações brasileiras, com base apenas no controle granulométrico e químico. Sugere-se a realização da caracterização mineralógica das partículas nucleantes, intermediárias e aderentes do *sinter feed*, visando à otimização do processo e à melhoria da qualidade intrínseca do produto, destacando os principais atributos que devem constituir a sua identidade microestrutural. Vislumbra-se, para os próximos anos, uma verdadeira revolução nos critérios que norteiam a análise técnica de minérios para os processos industriais de aglomeração.

Palavras-chave: processo de sinterização, minério de ferro, caracterização mineralógica.

Abstract

This paper provides a critical analysis of the methodology used in Brazil for routine technical evaluation of iron ore fines used in the sintering process based uniquely on chemical and granulometric parameters. The mineralogical characterization of adherents, intermediates and nucleants particles of sinter feed and the main attributes that should constitute its microstructural identity have been highlighted. It should contribute a great deal to optimize the process parameters during the various stages of the sintering process as well as promote better intrinsic sinter quality. Based on these concepts, it is expected that in future years, significant criterias will be developed for technical analysis of iron ores fines used in agglomeration industry.

Keywords: sintering process, iron ore, mineralogical characterization.

1. Introdução

A produção de sinteres com qualidade química, mecânica e metalúrgica elevada, associada a uma alta taxa de produtividade e baixo consumo de energia, está relacionada, entre outros fatores, com a qualidade intrínseca dos minérios de ferro empregados na mistura a sinterizar. Na maior parte das usinas siderúrgicas brasileiras, o sinter é produzido a partir de uma mistura composta por vários minérios, sendo que em alguns casos são empregadas dezenas de tipos diferentes. Critérios técnicos e econômicos são sempre usados para se estabelecer uma situação ideal.

Um dos pontos-chave do processo de sinterização é o emprego de uma metodologia consistente para avaliação da qualidade intrínseca dos minérios e otimização dessa mistura de modo a se obter uma melhor performance desse processo nas etapas de aglomeração a quente e a frio, além de se buscar uma maior adequação do comportamento do sinter no interior do alto-forno.

Os minérios brasileiros apresentam estruturas internas muito variadas, devido às diferentes condições de metamorfismo, tectonismo e intemperismo a que foram sujeitas, ou, mesmo, em virtude de sua gênese. Dessa forma, originaram-se minérios com diferentes constituintes mineralógicos, trama, tamanho e morfologia dos cristais, tamanho e morfologia dos poros, porosidade, forma e superfícies das partículas, etc. (Rosière, 1996; Vieira, 1996; Rosière et alii, 1997).

Apesar disso, as características estruturais têm sido negligenciadas no controle do processo de sinterização. A avaliação técnica de finos de minérios de ferro brasileiros, tanto por parte das minerações, quanto das siderúrgicas, tem sido rotineiramente baseada apenas na caracterização granulométrica e química dos componentes da mistura. Em função dessa lacuna existente, apresenta-se, nesse trabalho, uma análise crítica a respeito do tema em questão.

2. Minérios de ferro brasileiros

Os minérios brasileiros são praticamente todos do tipo hematítico e podem

ser divididos em diferentes categorias tipológicas apresentadas na Tabela 1 (Rosière et alii, 1997; Vieira et alii, 1999). Em sua maioria são anidros e possuem alto teor de ferro e, quando comparados com os minérios australianos, apresentam baixo teor de alumina. Os valores de perda ao fogo e de Fe^{2+} são geralmente baixos (Caporali et alii, 1998). Diferentes tipos de cristais de hematita (especular, martita, granular, microgranular, etc.), com tamanhos de cristais variando de $1\mu m$ até $1000\mu m$, são encontrados nos tipos de *sinter feed* existentes. Além disso, existem diferentes tipos de trama dos cristais, tais como granoblástica, lepidoblástica, granolepidoblástica, etc. (Rosière, 1996; Rosière et alii, 1997). Ademais, os minérios podem conter diferentes constituintes mineralógicos acessórios, tais como quartzo, caulinita, gibbsita, etc., contendo, ainda, diferentes valores de porosidades e de diâmetro dos poros (micro, meso e macro), que têm forte influência nas etapas de aglomeração a frio e a quente de finos minérios de ferro.

3. Classificação das partículas de minérios quanto à capacidade de microaglomeração

A mistura de sinterização, constituída por diversas matérias-primas e combustível, apresenta uma ampla faixa granulométrica, desde partículas mais finas até as mais grosseiras.

Essas partículas, antes de serem carregadas na máquina de sinterizar, são submetidas a uma etapa industrial muito importante, denominada de etapa de microaglomeração, onde são misturadas em um tambor em condições controladas de velocidade de rotação, tipos de revestimento, adição de água e fator de ocupação da mistura. O ajuste dessas variáveis permite controlar o movimento das partículas (regime cascata), de modo que, após um determinado tempo de residência, tem-se a produção de microaglomerados, que irão constituir o leito da máquina de sinterizar. Esses microaglomerados são formados por um núcleo, que

são preferencialmente de partículas grossas de minérios ou de sinter retorno, cobertas por uma camada aderente de partículas finas de minérios, combustíveis e fundentes. Em função da eficiência dessa etapa de microaglomeração, as partículas da mistura de minérios podem ser classificadas em nucleantes, intermediárias e aderentes.

Na Tabela 1, é apresentada uma ilustração da classificação adotada pela Nippon Steel (Ishikawa et alii, 1982) que estabelece que as partículas do *sinter feed* com tamanho acima de $0,7mm$ são consideradas como nucleantes, abaixo de $0,7mm$ e acima de $0,2mm$, como intermediárias e abaixo de $0,2mm$, como aderentes. De acordo com esse trabalho e de diversos outros da literatura, que propõem outras classificações diferentes, a mistura deve conter a menor quantidade possível de partículas intermediárias e uma relação nucleantes/aderentes adequada de modo a propiciar uma boa permeabilidade de carga durante a sinterização (Araújo Filho et alii, 1986; Nogueira, 1987; Caporali et alii, 1998).

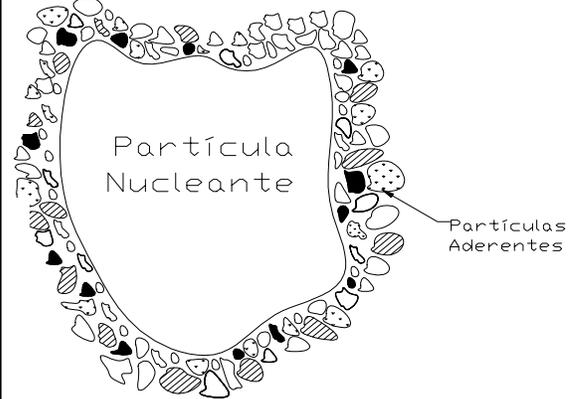
4. Qualidade de minérios de ferro para sinterização

A composição química da mistura de minérios de ferro para o processo de sinterização é estabelecida em função das especificações da composição química do sinter para uso nos altos-fornos. Ademais, existem outras exigências quanto aos teores de certos constituintes que prejudicam a qualidade metalúrgica e/ou mecânica do sinter e dos produtos subsequentes, tais como o ferro-gusa e aço.

De um modo geral, tem-se o controle dos teores de Fe_{Total} , SiO_2 , Al_2O_3 , P, Mn, K_2O , Na_2O e PPC dos minérios da mistura, cujos limites de especificação variam para cada empresa. Nos processos siderúrgicos, objetiva-se o emprego de finos de minérios com altos teores de ferro e baixos teores de ganga e de impurezas.

Sabe-se que a distribuição granulométrica dos minérios afeta, de forma

Tabela 1 - Descrição geral dos tipos e das características intrínsecas de partículas do *sinter feed* de minérios de ferro brasileiros e da estrutura ideal do microaglomerado produzido na etapa de aglomeração a frio (Ishikawa et alii, 1982; Araújo Filho et alii, 1986; Rosière, 1996; Vieira et alii, 1999).

↑ 6,3 mm	Partículas do <i>sinter feed</i>		Estrutura ideal do microaglomerado (a frio) 
	Supergrossas Não apresentam a capacidade de aderir as partículas mais finas ao seu redor e não contribuem para o fenômeno de microaglomeração a frio. Devem ser minimizadas na composição da mistura a sinterizar		
3,0 mm	Nucleantes 2	Nucleantes Apresentam a capacidade de aderir as partículas mais finas ao seu redor e constituem-se nos núcleos dos aglomerados. São partículas policristalinas anidras ou hidratadas e não devem participar efetivamente no fenômeno de formação de líquido durante a queima. Deve-se controlar a quantidade de partículas nucleantes goethíticas (altos valores de PPC e de P) de modo a evitar alta contração e formação de grandes trincas no bolo de sinterização e aumento do teor de fósforo no sinter e no gusa. Podem apresentar diferentes tipos de tramas, constituintes mineralógicos, tamanhos de cristais, graus de porosidade e tipos de superfícies. Essas características influenciam os parâmetros de redutibilidade, degradação durante redução e de amolecimento e fusão do sinter. Não devem conter sílica oclusa na sua estrutura ou mesmo na forma liberada.	Tramas das Partículas Nucleantes Granoblástica: <i>Cristais xenomorfos de hematita complexamente intercrescidos (Ex. Minas de Mutuca, C. Feijão, Carajás, etc.)</i> Lepidoblástica: <i>Cristais orientados de hematita ao longo do plano basal (Ex. Minas de Andrade, Cauê, Morro Agudo, etc.)</i> Mosaico: <i>Cristais de bordas retas sem orientação preferencial. (Ex. Minas de Casa de Pedra, Cauê, Andrade, etc.)</i> Microgranular: <i>Hematita microcristalina disposta em uma trama granoblástica (Ex. Minas de Carajás e Corumbá).</i> Treliça: <i>Cristais alongados sem orientação preferencial (Ex. Minas de Carajás).</i>
1,0 mm ou 0,7 mm	Nucleantes 1	São os nucleantes ideais, pois são mais efetivos com relação a capacidade de formar a camada aderente	
0,3 mm ou 0,2 mm	Intermediárias Essas partículas não se comportam nem como nucleantes e nem como aderentes. Devem ser minimizadas na composição da mistura a sinterizar.		Tipologia das Partículas Aderentes e Nucleantes: Especularíticas (Ex. Minas de Cauê, Andrade, etc.). Martíticas (Ex. Minas de Mutuca, C. Feijão, etc.). Granulares (Ex. Mina do Pico, etc.). Microgranulares (Ex. Minas de Carajás). Magnetíticas (Ex. Mina de C. de Feijão, etc.). Goethíticas (Ex. Minas de Alegria, Capanema, etc.).
0,105mm	Aderentes São partículas que formam a camada aderente ao redor do núcleo no microaglomerado. Podem apresentar diferentes características mineralógicas de modo a influenciar fortemente os fenômenos de aglomeração a frio e de formação da fase líquida durante a queima e na qualidade intrínseca do sinter formado.		
↓	Superfinas São partículas de <i>pellet feed</i> . Sua participação no <i>sinter feed</i> deve ser minimizada. Contribuem fortemente para diminuir a permeabilidade do leito a sinterizar. A alumina nessa fração aumenta o RDI (<i>Reduction Degradation Index</i>) do sinter.		

acentuada, as etapas de aglomeração a frio e a quente do processo de sinterização. Por isso, torna-se importante controlar as porcentagens das partículas supergrossas, nucleantes, aderentes, intermediárias e superfinais da mistura a sinterizar.

A moderna tecnologia de sinterização, visando a otimizar produtividade e baixo consumo de energia no processo, tem como diretriz a produção de sínteres constituídos por uma parte fundida e outra não fundida. Em contraste com os sínteres produzidos em décadas passadas, chamados de sínteres homogêneos, onde se tinha praticamente todo material fundido, tem-se atualmente explorado a produção de sínteres heterogê-

neos, onde a parte não fundida aumentou significativamente, atingindo patamares de 30% a 40%, ou mais, da área da seção do aglomerado (Nogueira, 1987). Nesse sentido, procura-se preservar os núcleos dos microaglomerados durante o processamento térmico na máquina de sinterizar e permitir a fusão somente das partículas aderentes com o menor aporte térmico possível. Os fundentes devem ser empregados como partículas aderentes, para que, após a queima da mistura, venha compor a parte fundida do síter com características mais homogêneas possíveis.

Um ciclo térmico apropriado deve ser empregado, a fim de obter-se um síter com uma microestrutura ideal, mos-

trada na Figura 1, capaz de garantir um excelente comportamento no interior do alto-forno, devido às suas excepcionais propriedades mecânicas, químicas e metalúrgicas. Deve-se controlar a temperatura máxima de sinterização de modo a evitar que o síter produzido tenha uma microestrutura rica em hematita secundária romboédrica esqueliforme e ferritos de cálcio colunar (Ishikawa et alii, 1982; Ishikawa et alii, 1983; Dawson, 1993; Pimenta e Seshadri, 2002 a).

A concepção de produzir sínteres com microestrutura desejada para os altos-fornos aliada a uma alta produtividade e baixo consumo de energia na máquina de sinterizar é fortemente dependente de diversas variáveis de pro-

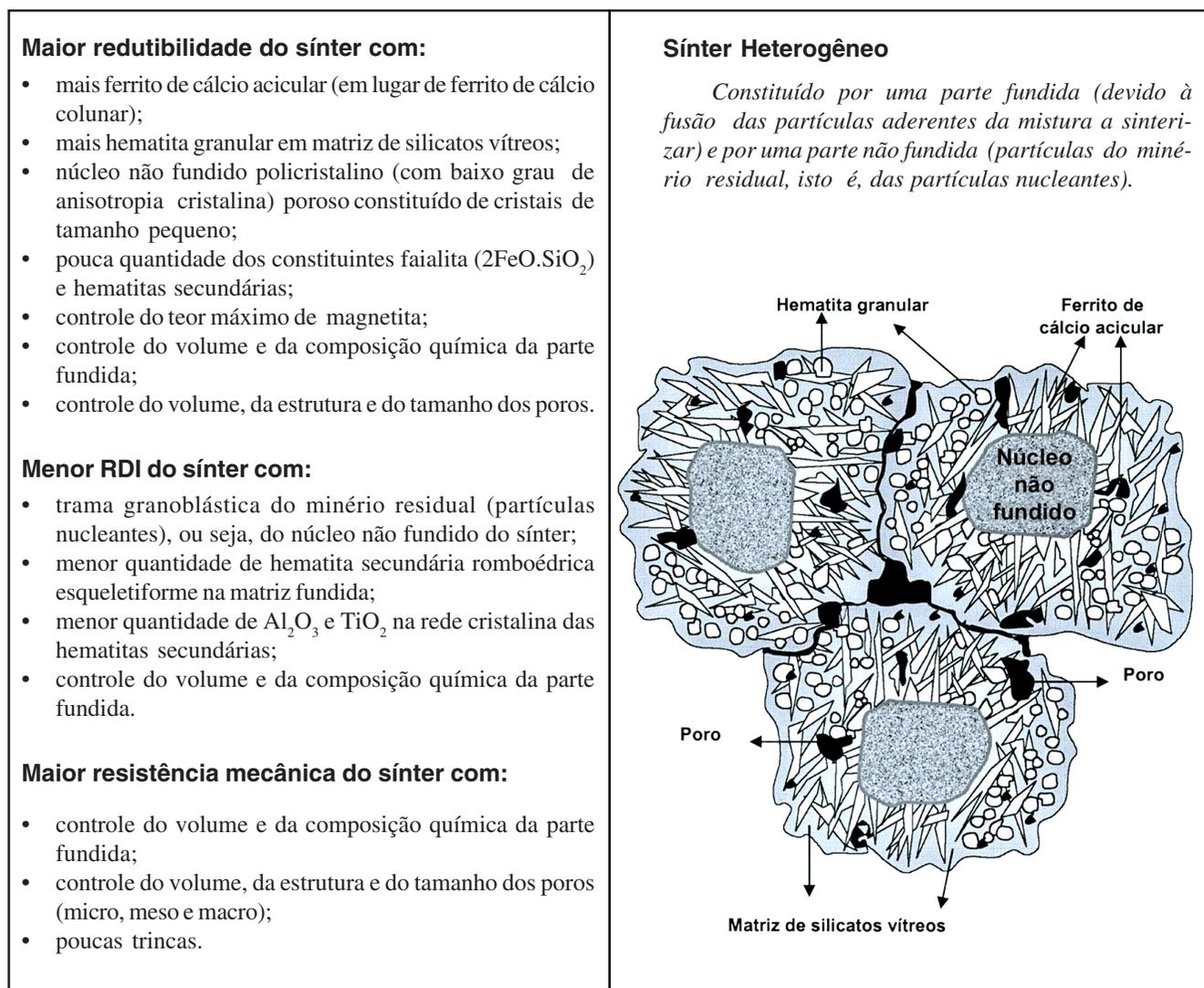


Figura 1 - Microestrutura ideal do síter de minério de ferro (modificada de Ishikawa et alii, 1982; Ishikawa et alii, 1983; Dawson, 1993; Pimenta e Seshadri, 2002 a, b).

cesso, assim como do conhecimento dos atributos microestruturais dos minérios de ferro em conjugação com suas características granuloquímicas.

Diversos estudos na literatura têm discutido a importância e a relação existente entre as características microestruturais dos finos de minérios e a eficiência das etapas de aglomeração a frio e a quente no processo de sinterização e na qualidade final dos sínteres. A seguir, são apresentadas algumas conclusões apresentadas nesses estudos.

- A presença de finos de minérios limoníticos influencia a temperatura de fusão das partículas aderentes (Sato et alii, 1986).
- O tamanho, a forma e a distribuição dos cristais e poros das partículas nucleantes do *sinter feed*, entre outros fatores, influenciam a redutibilidade dos sínteres (Goldring & Fray, 1989).
- O uso de minérios hidratados afeta a reação entre a fase líquida e o núcleo durante o processo de sinterização (Pereira, 1992).
- Os fatores de tamanho de cristal e proporção de minérios hidratados, junta-

mente com minérios hematíticos compactos na mistura de sinterização, contribuem para melhorar a redutibilidade do síter (Pacheco et alii, 1997).

- Minérios goethíticos têm um efeito marcante na estrutura da parte fundida do síter, influenciando na formação de ferritos de cálcio, escória vítrea e porosidade, fatores que, por sua vez, controlam os parâmetros metalúrgicos e mecânicos do síter, tais como redutibilidade, resistência, RDI (*Reduction Degradation Index*), etc. (Hsieh & Whiteman, 1993).
- A intensidade de degradação granulométrica dos sínteres, durante redução em baixas temperaturas, é fortemente influenciada pelos seus tipos de constituintes microestruturais e pela presença de Al_2O_3 e TiO_2 na rede cristalina das hematitas secundárias (Pimenta & Seshadri, 2002 a,b).

Dentro desse contexto, a Tabela 2 apresenta um roteiro dos principais parâmetros mineralógicos, microestruturais e granulométricos que devem constituir a identidade estrutural do *sinter feed*. Esses atributos devem ser avaliados jun-

tamente com as suas características químicas. O desconhecimento desses atributos, assim como os da mistura a sinterizar, dificulta substancialmente a otimização dos fatores produtividade, qualidade e custo, que constituem o alicerce da sobrevivência desse processo de aglomeração.

5. Cenários futuros da comercialização de minérios de ferro

São previstas mudanças significativas nas relações entre fornecedores e consumidores de finos de minérios para sinterização no mercado brasileiro e internacional. Numa primeira fase, as minerações estarão fornecendo aos seus clientes, além da análise granuloquímica, a constituição mineralógica dos minérios.

Nesse sentido, muitas empresas investirão ou já estão investindo na elaboração de modelos tridimensionais geológicos-tipológicos de suas jazidas, permitindo ao planejamento de lavra incorporar critérios mineralógicos na composição dos “blends” de minérios. De

Tabela 2 - Principais atributos que deverão constituir a identidade estrutural de finos de minério de ferro para uso em sinterização (Vieira et alii, 1999).

Parâmetro de Controle	Descrição	Influência no síter	Influência na sinterização
Constituintes mineralógicos das partículas aderentes, intermediárias e nucleantes.	Caracterização mineralógica quantitativa das fases presentes por meio de microscopia ótica de luz refletida.	Microestrutura, porosidade, redutibilidade, RDI, resistência, parâmetros de amolecimento, fusão e gotejamento.	Afeta fortemente a eficiência da etapa de microaglomeração, rendimento da mistura, consumo de energia e produtividade do processo.
Tamanho dos cristais das partículas nucleantes.	Tamanhos extremos e moda dos valores por meio de microscopia ótica de luz refletida.	Redutibilidade.	Afeta a qualidade metalúrgica e mecânica do síter.
Trama das partículas nucleantes.	Avaliação qualitativa por meio de microscopia ótica.	RDI e redutibilidade.	
Forma e tipos de superfícies das partículas nucleantes, intermediárias e aderentes.	Avaliação da forma via lupa binocular e microscopia ótica de luz refletida.	RDI e resistência.	
Porosidade total, forma e tamanho dos poros de partículas nucleantes.	Grau de porosidade e tamanho dos poros via microscopia ótica de luz refletida e porosímetro de mercúrio.	Resistência e redutibilidade.	
Relação % nucleantes / %aderentes, % de partículas intermediárias, e % de partículas acima de 1,0 mm (Parâmetro granulométrico).	Avaliação por meio de análise granulométrica.	Redutibilidade, resistência e RDI.	Afeta a eficiência da etapa de microaglomeração a frio, permeabilidade do leito a sinterizar e produtividade do processo.

forma ilustrativa, pode-se citar que essa situação já é uma realidade na empresa Samarco Mineração S.A., onde o concentrado produzido na usina de beneficiamento (Unidade de Germano, município de Mariana/MG) é fornecido para a unidade de pelotização (Unidade de Ponta Ubu, município de Anchieta/ES), obedecendo a critérios rigorosos de controle de qualidade sob o aspecto de composição mineralógica (Costa et alii, 1998).

Numa segunda fase, informações complementares a respeito da estrutura desses “blends” também serão fornecidas aos consumidores, tais como ordem de grandeza do tamanho do cristal (moda), tipo de trama, etc. Entretanto, é necessário que os envolvidos na sinterização tenham um maior domínio de conhecimento a respeito dos atributos estruturais do minério, e da mistura a sintetizar, que realmente interferem no trinômio produtividade, qualidade e custo. Muitos estudos de modelagem matemática e trabalhos de pesquisa ainda precisam de ser efetuados nessa área para consolidação de uma moderna tecnologia de produção de sinter.

6. Considerações finais

Em função da operacionalidade de geração e da capacidade de interpretação dessas diversas informações inerentes ao minério, empregando recursos mais avançados (como, por exemplo, o analisador de imagem acoplado ao microscópio ótico de luz refletida e o desenvolvimento de softwares aplicativos para minérios de ferro), é possível vislumbrar, para os próximos anos, uma verdadeira revolução nos critérios que norteiam a análise técnica de minérios para os processos de aglomeração no mercado nacional e internacional.

Referências bibliográficas

- ARAÚJO FILHO, G.M., TORRES, B., SESHADRI, V. Caracterização de misturas para sinterização. *Meturgia - ABM*, v.42, n.338, p.19-23, 1986.
- CAPORALI, L. et alii. Relação microestrutura - propriedades - desempenho de minérios de ferro na sinterização. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 29, 1998. Belo Horizonte. *Anais...* São Paulo: ABM, 1998, p. 701-717.
- COSTA, A.G.D. et alii. A importância do modelamento geológico-tipológico no controle de qualidade dos concentrados e pelotas de minérios de ferro da Samarco Mineração S.A. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 29, 1998. Belo Horizonte. *Anais...* São Paulo: ABM, 1998, p. 545-554.
- DAWSON, P. R. Part 2 - Research studies on sintering and sinter quality. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 20, n.2, p. 137-143, 1993.
- GOLDRING, D. C., FRAY, T. A. T. The characterization of iron ores for production of high quality sinter. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 16, n. 2, p. 83-89, 1989.
- HSIEH, L., WHITEMAN, J.A. Effect of raw materials composition on the mineral phases in lime-fluxed iron ore sinter. *ISIJ International*, v. 33, n.4, p. 462-473, 1993.
- ISHIKAWA, Y. et alii. Improvement of sinter quality based on mineralogical properties of ores. *Ironmaking Conference Proceedings, AIME*. v.42, p. 17-29, 1983.
- ISHIKAWA, Y. et alii. Recent progress in the sintering technology - high reducibility and improvement of fuel consumption. *Ironmaking Conference Proceedings, AIME*, v. 41, p. 80-89, 1982.
- NOGUEIRA, P.R.S.M. *Relação entre características das frações grossas do minério e produtividade e qualidade do sinter*. Belo Horizonte: CPGEM/ EEUFMG, 1987. 190 p. (Dissertação de Mestrado)
- PACHECO, T.A., ROCHA, G.T., NAJAR, F.J. Adequação de mistura de minérios de ferro para produção de sinter de alta redutibilidade. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 28, 1997. Vitória. *Anais...* São Paulo: ABM, 1997, p. 387-404.
- PEREIRA, E. A. C. Reações entre fase líquida e núcleo em sinterização de minérios de ferro. In: SEMINÁRIO INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA ÁREA DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 1992, Santos. *Anais...* São Paulo:ABM, 1992, p.347-371.
- PIMENTA, H., SESHADRI, V. Characterization of structure of iron ore sinter and its behaviour during reduction at low temperatures. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 29, n.3, p. 169-174, 2002.
- PIMENTA, H., SESHADRI, V. Influence of Al₂O₃ and TiO₂ on reduction degradation behaviour of sinter and hematite at low temperatures. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 29, n.3, p.175-179, 2002.
- ROSIÈRE, C. A. Um modelo para evolução microestrutural de minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte II - Trama, textura e anisotropia de susceptibilidade magnética. *Geonomos*, v.4, n.1, p.61-75, 1996.
- ROSIÈRE, C.A. et alii. Classificação genética de minérios de ferro - problemas e vícios - Proposta de uma classificação tipológica para indústria. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 28, 1997. Vitória. *Anais ...* São Paulo: ABM, 1997, p. 295-302.
- SATO, S. et alii. Melting model for iron ore sintering. *Transaction ISIJ*, v. 26, p. 282-290, 1986.
- VIEIRA, C.B. *Avaliação da qualidade intrínseca de minérios de ferro para uso em altos-fornos*. Belo Horizonte: CPGEM-EEUFMG, 1996. 248p. (Tese de doutorado).
- VIEIRA, C. B. et alii. Geometallurgical approach for quality control of iron ores for agglomeration in iron and steel industry. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BENEFICIATION, AGGLOMERATION AND ENVIRONMENT- ISBAN, 1999, Bhuvanewar, Índia. *Proceedings...* Bhuvanewar, p. 3-10. 1999.

Artigo recebido em 19/12/2002 e
aprovado em 13/05/2003.



REM - Revista Escola de Minas
www.rem.com.br
 E-mail: remjorio@ouropreto.feop.com.br