

PANORAMA DA QUALIDADE MECÂNICA E METALÚRGICA DOS MINÉRIOS DE FERRO GRANULADOS PARA USO EM ALTO FORNO E PROCESSOS DE REDUÇÃO DIRETA⁽¹⁾

Arthur Napoleão de Souza Neto⁽²⁾

Paulo Pinheiro⁽³⁾

Edésio Corsetti Purcino⁽⁴⁾

José Carlos Marcelino Pereira⁽⁵⁾

Rodrigo Ottoni da Silva Pereira⁽⁶⁾

Resumo

É mostrado o perfil de resistência e qualidade metalúrgica dos minérios de ferro granulados do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais para uso em alto forno e processos de redução direta e comparada sua qualidade com a dos minérios das províncias minerais de Carajás, Urucum e Hamersley (Austrália). Além de poder ser utilizado como referência para futuras avaliações de granulados, o perfil apresentado possibilitou concluir que os vários índices utilizados para avaliar a qualidade do minério não são de todo independentes, havendo uma correlação entre o índice de resistência do granulado e os de desintegração (RDI), redutibilidade e metalização.

PALAVRAS -CHAVE: MINÉRIO DE FERRO - GRANULADO - AVALIAÇÃO

(1) Trabalho a ser apresentado no 1º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro: Caracterização, Beneficiamento e Pelotização, 14 a 17 de outubro de 1996, Ouro Preto - MG

(2) Engenheiro Metalurgista, Gerente de Pesquisas de Minério de Ferro, Superintendência de Tecnologia da CVRD.

(3) Engenheiro Metalurgista, M.E., PhD, Professor Titular da UFMG. Ex-Gerente de Pesquisas Metalúrgicas da Superintendência de Tecnologia da CVRD.

(4) Engenheiro Metalurgista, M.Sc., pesquisador, Superintendência de Tecnologia da CVRD.

(5) Técnico Metalurgista, Metramin. Ex-técnico da Superintendência de Tecnologia da CVRD.

(6) Engenheiro Metalurgista, M.Sc., pesquisador, Superintendência de Tecnologia da CVRD.

1. Introdução

Usualmente a siderurgia a coque utiliza em seus altos-fornos cerca de 80% de sinter e complementa o restante da carga metálica com pelotas e/ou minério de ferro granulado. A maior ou menor participação das pelotas ou do granulado depende da demanda por maior volume de ferro gusa - que favorece o uso das pelotas - ou por gusa de menor custo - que favorece o uso do granulado. Embora o consumo de granulado por alto-forno a coque seja relativamente pequeno, o somatório da quantidade demandada é grande. Por outro lado, a carga metálica da maioria dos altos-fornos a carvão vegetal é composta com 100% de granulado e a dos reatores de redução direta com até 50%. Isto significa que o consumo anual de granulado supera 80 milhões de toneladas.

Diante da importância desse mercado a CVRD iniciou há quinze anos um programa sistemático de avaliação da qualidade de granulados, tendo avaliado amostras de minérios de elevado número de jazidas e minas do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, bem como das demais províncias minerais brasileiras - Carajás e Urucum - além de granulados da Austrália. O grande volume de dados acumulado possibilitou à CVRD conhecimento bastante preciso do panorama e aspectos relativos à qualidade do minério granulado existente no mundo.

O presente trabalho tem por objetivo mostrar:

1. o perfil de resistência e qualidade metalúrgica dos granulados do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais (que é a província mineral que no mundo apresenta a maior variedade de minérios granulados), para uso em alto forno e processos de redução direta;
2. como se correlacionam os diversos índices de qualidade dos minérios;
3. como minérios de boa aceitação no mercado mundial, oriundos de outras províncias minerais, se posicionam em relação aos do Quadrilátero.

Além desses objetivos, pretende-se que o perfil de qualidade aqui apresentado constitua ampla base de referência para avaliações de qualidade de granulados, feita por qualquer laboratório.

2. Sistema de ensaios de avaliação da qualidade utilizado pela CVRD

Na Superintendência de Tecnologia da CVRD tem-se adotado a filosofia de avaliar os minérios segundo os procedimentos de ensaios mais utilizados pela indústria siderúrgica, de forma a se criar uma base comum para o entendimento das informações enviadas aos clientes ou deles advindas.

Assim, a menos da qualidade química e distribuição granulométrica (que não fazem parte do escopo desse trabalho), a avaliação da qualidade de minério granulado para uso em alto forno e processos de redução direta compreende a avaliação dos seguintes índices:

Granulado para alto forno	Granulado para redução direta
resistência mecânica	resistência mecânica
crepitação	crepitação
desintegração (RDI e LTB)	desintegração
reduzibilidade	reduzibilidade metalização

Ao contrário da análise química e granulométrica, os valores dos índices que expressam o comportamento acima dependem do procedimento de ensaio utilizado para fazer a avaliação. Os resultados apresentados na próxima seção foram obtidos aplicando-se os ensaios resumidos a seguir.

Resistência mecânica. Foi avaliada por meio do **ensaio de tamboramento ISO 3271**. Esse ensaio possibilita estimar a geração de finos que ocorre no transporte e manuseio do minério. A amostra, 15 kg, de 10,0 a 40,0 mm, é colocada num tambor de dimensões padronizadas, que é posto a girar a 25 rpm. Após 200 voltas o minério é retirado e peneirado. A percentagem de minério maior que 6,35 mm é tomada como índice de resistência ao tamboramento do minério e a percentagem menor que 0,50 mm expressa o índice de abrasão.

Degradação térmica. Foi avaliada por meio do **ensaio de crepitação COISRMJ**: objetiva prever se o minério irá estilhaçar e gerar finos ao entrar em contato com os gases do alto-forno. Consiste em se submeter a amostra de granulado, 500 g, de 19,0 a 25,4 mm, a aquecimento brusco introduzindo-a numa mufla previamente aquecida a

700 °C. Depois de 30 min, é retirada para resfriamento ao ar ambiente e então peneirada. A percentagem de minério menor que 4,76 mm é tomada como o índice de crepitação do minério. Como a repetibilidade desse ensaio em geral não é boa, trabalha-se com quadruplicatas.

Desintegração. Foi avaliada tanto por meio do **ensaio RDI ISO 4696-2** quanto pelo **LTB SGA**: ambos objetivam avaliar a suscetibilidade do minério à desintegração em condições fracamente redutoras, que são as condições que prevalecem na parte superior da cuba do alto-forno, quando a hematita é reduzida a magnetita. O RDI é oriundo da siderurgia japonesa e o LTB da alemã. No ensaio RDI a amostra, 500 g, de 16,0 a 20,0 mm, é reduzida a 550 °C por 30 min em leito estático e, em seguida, é resfriada sob gás inerte até a temperatura ambiente. Então é submetida a tamboramento por 30 min em tambor de dimensões padronizadas e velocidade de 30 rpm. A amostra tamborada é peneirada e a percentagem de material menor que 2,83 mm é definido como o RDI ("reduction degradation index") do minério.

O LTB é um ensaio dinâmico, ou seja, a amostra, 500g, de 10,0 a 16,0 mm, é submetida, simultaneamente, a tamboramento e redução, esta a 500 °C, por 60 min. Em seguida é resfriada sob gás inerte até a temperatura ambiente. A amostra é então peneirada e verificada a percentagem de minério retido em 6,35mm e a de finos passante em 0,50mm. A percentagem maior que 6,35 mm expressa o índice de resistência à desintegração do minério e a percentagem menor que 0,50mm seu índice de abrasão (sob redução).

Redutibilidade. Foi avaliada pelo **ensaio de Redução JIS 8713 ou ISO 7215**: objetiva determinar o grau de facilidade que o gás redutor terá para remover o oxigênio ligado ao ferro. A amostra, 500 g, de 18,0 a 20,0 mm, é colocada dentro de uma retorta e esta é pendurada numa balança. Aquece-se o conjunto a 900 °C e faz-se a redução do minério por 3 h. À medida que se processa a reação de redução do óxido de ferro pelo CO, vai-se registrando a quantidade de oxigênio perdida pelo minério. A redutibilidade é avaliada pela análise da curva de perda de oxigênio em função do tempo e pelo grau de redução ao final das 3 horas.

Desintegração e metalização. Foi avaliada por meio do **ensaio "Midrex Linder Test" -MLT**. Esse ensaio foi desenvolvido pelo Centro Técnico da Midrex para avaliar a qualidade metalúrgica de minérios destinados ao processo de redução direta Midrex. Com ligeiras modificações foi normalizado pela ISO como Norma I1257. Visa determinar tanto a metalização quanto a suscetibilidade à desintegração do

minério sob redução. A amostra, 500g, de 9,5 a 19,0 mm, é simultaneamente tamborada e reduzida a 760 °C, por 5 horas. Após resfriamento em atmosfera inerte, é peneirada e a percentagem de finos menores que 3,36mm expressam o índice de desintegração do minério. Por análise química determina-se sua quantidade de ferro total e metálico. O grau de metalização é a percentagem de ferro metálico em relação ao ferro total da amostra ($GM = 100 \times FeM/Fet$).

Qualidade do minério. Os resultados de todos esses ensaios definem o perfil de qualidade metalúrgica do minério. O granulado de qualidade ideal para uso na siderurgia seria o que possuísse o seguinte perfil: alta resistência mecânica, baixos índices de crepitação e desintegração e elevada redutibilidade/metalização.

É importante ressaltar que esses ensaios não tem por objetivo simular condições operacionais dos reatores, o que ficaria extremamente dispendioso e de difícil repetibilidade e reprodutibilidade. São na realidade ensaios com objetivos fenomenológicos, cujos resultados devem ser considerados em termos relativos. Em outras palavras, esses ensaios visam ordenar os minérios segundo seu comportamento no fenômeno explicitado pelo ensaio, para então definir os **índices de aceitação** a partir do desempenho do minério no alto forno ou nos reatores de redução direta.

3. Resultados

As Figuras 1 a 6 mostram, respectivamente, os resultados dos ensaios de tamboramento, crepitação, RDI, LTB, Redução e Linder Midrex dos granulados.

Esses resultados estão apresentados da seguinte forma:

- os resultados referentes aos minérios do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais foram tomados como "pano de fundo" para a apresentação e aparecem em ordem decrescente de resistência;
- sobre o perfil dos resultados relativos aos minérios do Quadrilátero foram posicionados resultados típicos referentes a minérios oriundos das províncias minerais de Carajás, Urucum e Hamersley (Austrália).

Perfil de qualidade dos minérios do Quadrilátero e correlação entre seus índices de qualidade metalúrgica.

Dois aspectos destacam-se nessas figuras. O primeiro é a grande diversidade de qualidade de minério do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. O segundo é que os vários índices de qualidade guardam algum tipo de correlação, ou seja, não são de todo independentes. Foram obtidas os seguintes índices de correlação entre eles:

	Crepitação - 4,76	RDI -2,83	LTB -0,50	Finos MLT -3,36	Redução %	Metalização %
Tamboramento	0,00	-0,87	-0,79	-0,75	-0,39	-0,17
Crepitação	-	-0,02	0,07	0,20	-0,14	-0,30
RDI	-	-	0,86	0,83	0,35	0,10
LTB	-	-	-	0,78	0,09	-0,15
Finos MLT	-	-	-	-	0,18	0,01
Redução	-	-	-	-	-	0,70

Assim, no caso dos minérios do Quadrilátero (quase todos de origem metassomática) a tendência foi de os minérios de maior resistência mecânica apresentarem também maior resistência à desintegração (ou seja, menor RDI/LTB) e, por outro lado, menor redutibilidade. A crepitação é um ensaio bastante difundido, mas não se verificou correlação alguma entre seus resultados e os dos outros ensaios, provavelmente porque o fenômeno da crepitação está mais ligado à disposição ao acaso de elementos e fatores estruturais na microestrutura do minério (por exemplo, presença de lâminas de argila entre camadas de hematita). Outra possibilidade é de que a dispersão dos resultados de crepitação, por ser elevada, tenha obscurecido a correlação.

Qualidade de minérios de províncias distintas do Quadrilátero.

Os resultados estão identificados nas Figuras pelo símbolo (o). Pode-se verificar que esses minérios apresentam índice de resistência acima de 80%, baixa crepitação, médio RDI e alta redutibilidade. Em resumo, são minérios de bom comportamento metalúrgico, muito utilizados nos altos-fornos das usinas asiáticas, européias e Mercosul como complemento da carga de sinter/pelotas.

Em termos de gênese, esses minérios são de minas cujo grau de metamorfismo é bem mais baixo que o da maioria das minas do Quadrilátero. Por isto apresentam granulação mais fina e fogem um pouco das correlações estabelecidas para os minérios do Quadrilátero.

4. Conclusões

1. O Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais possui grande diversidade de minérios de ferro granulados, provavelmente a maior do mundo, devido à grande variação do grau de metamorfismo apresentado por suas jazidas/minas.
2. O grande volume de dados obtidos na avaliação dos granulados do Quadrilátero possibilitou concluir que os diversos índices que definem a qualidade global do minério não são de todo independentes, ou seja, verificou-se correlação direta da resistência mecânica do minério com sua capacidade de resistir à desintegração durante a redução (isto é, minérios mais resistentes tenderam a apresentar menor RDI/LTB). Por outro lado, verificou-se correlação inversa da resistência com a redutibilidade. Isto significa que pode ser considerado como exceção caso como o de granulados com elevada resistência, baixo RDI e elevada redutibilidade.
3. Não se verificou correlação entre o índice de crepitação e os demais índices.
4. Por razões comerciais, os minérios não foram identificados. Apesar disto, o perfil de qualidade aqui apresentado pode ser utilizado como referência para qualquer avaliação (ou classificação) futura de minério de ferro granulado para uso em alto forno e processos de redução direta.

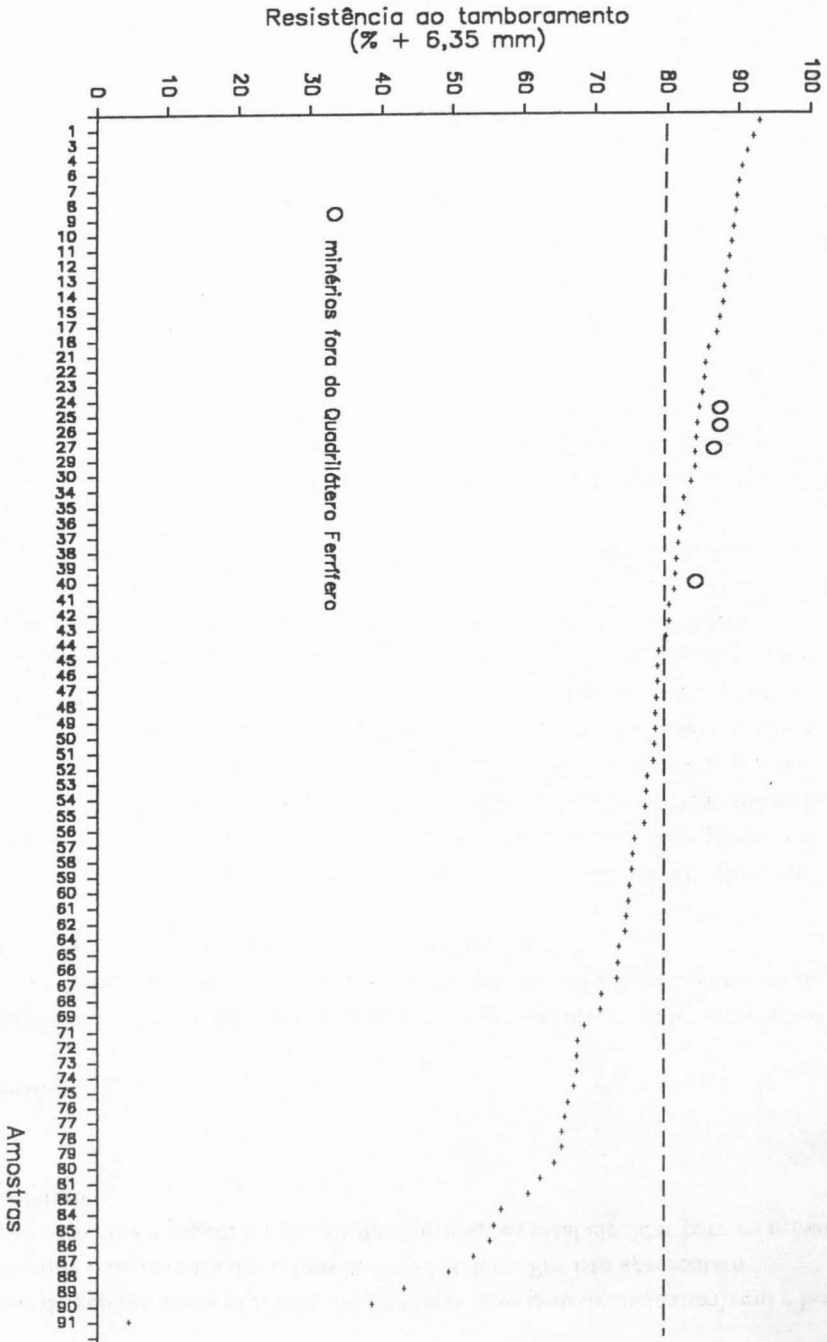


Figura 1 — Resultados dos ensaios de tamboramento ISO 3271

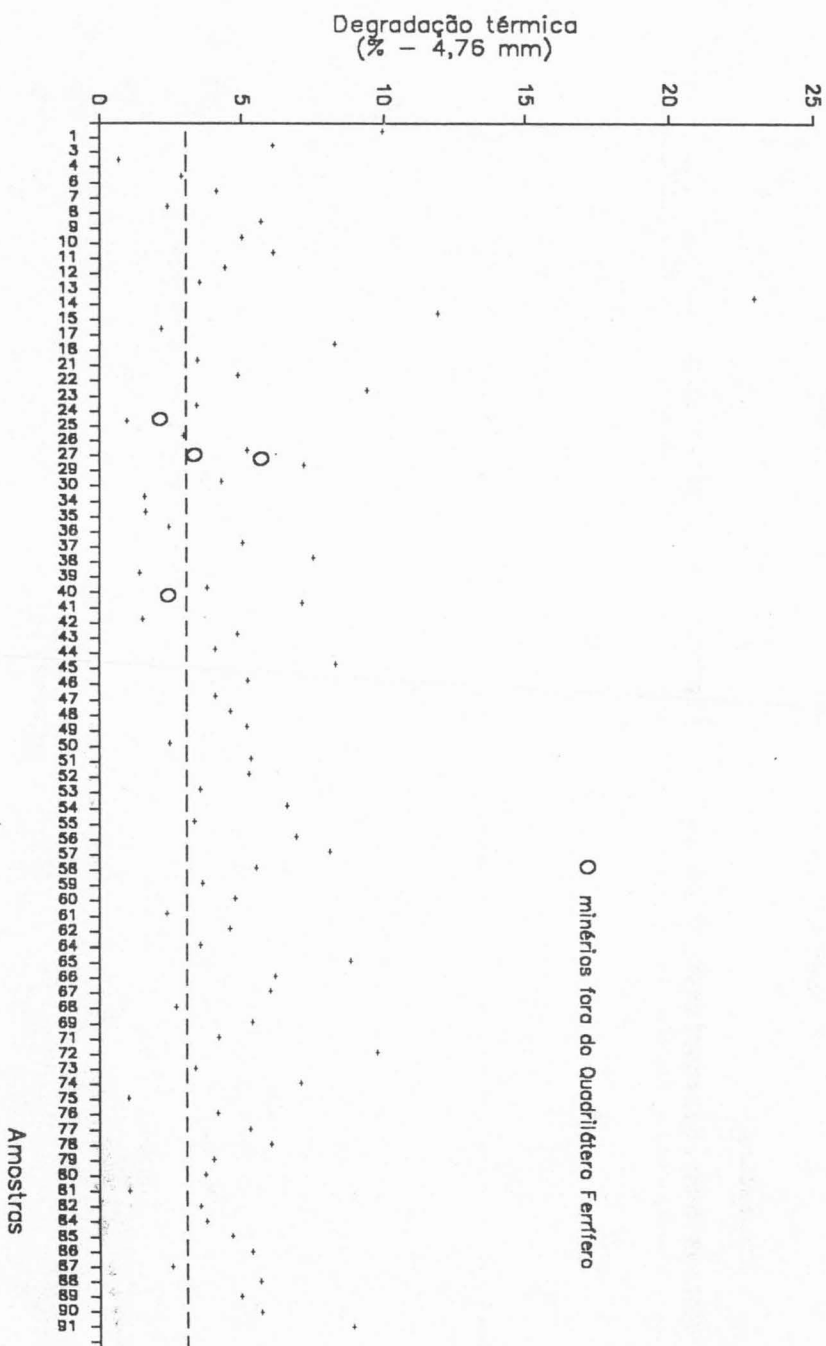


Figura 2 — Resultados dos ensaios de crepitação procedimento COISRMJ

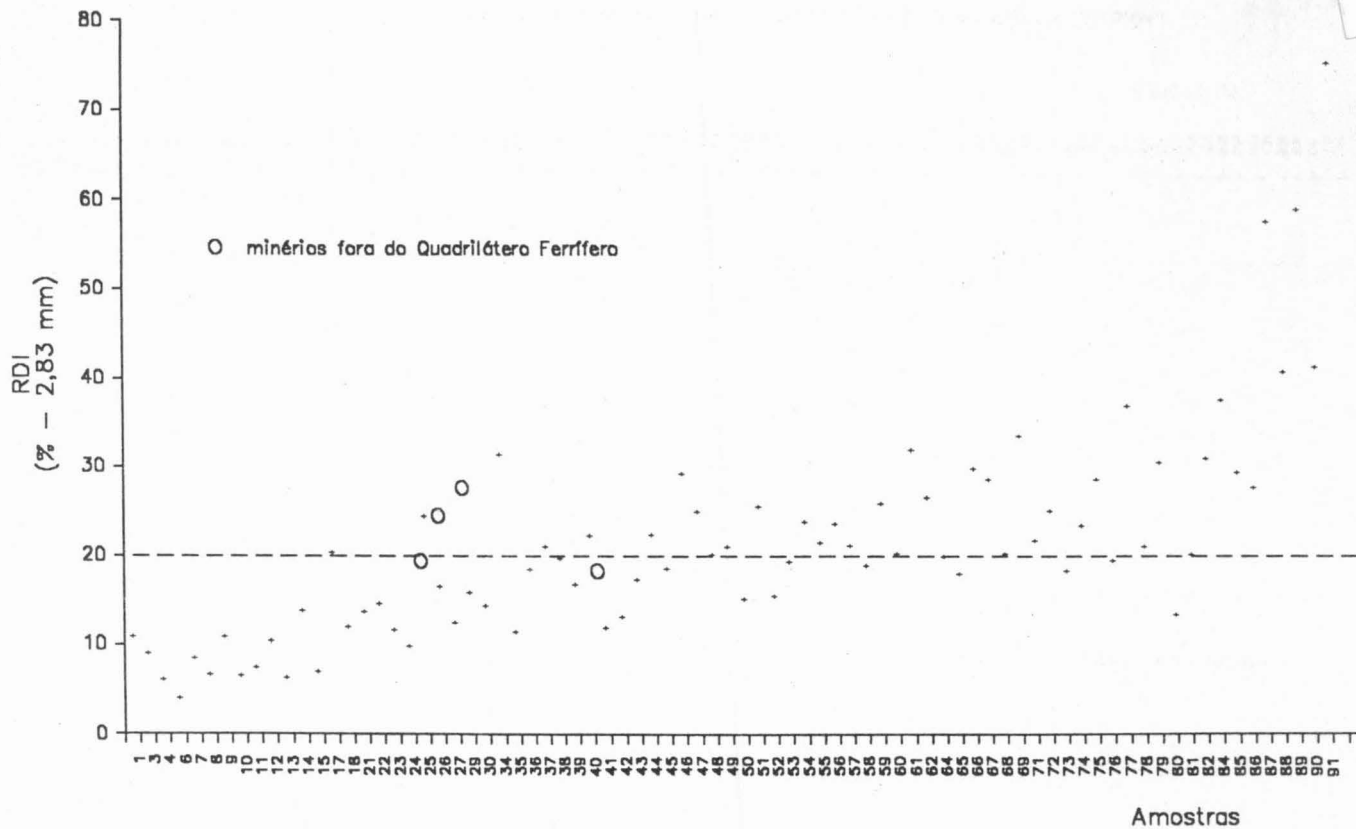


Figura 3 – Resultados dos ensaios de RDI ISO 4696-2

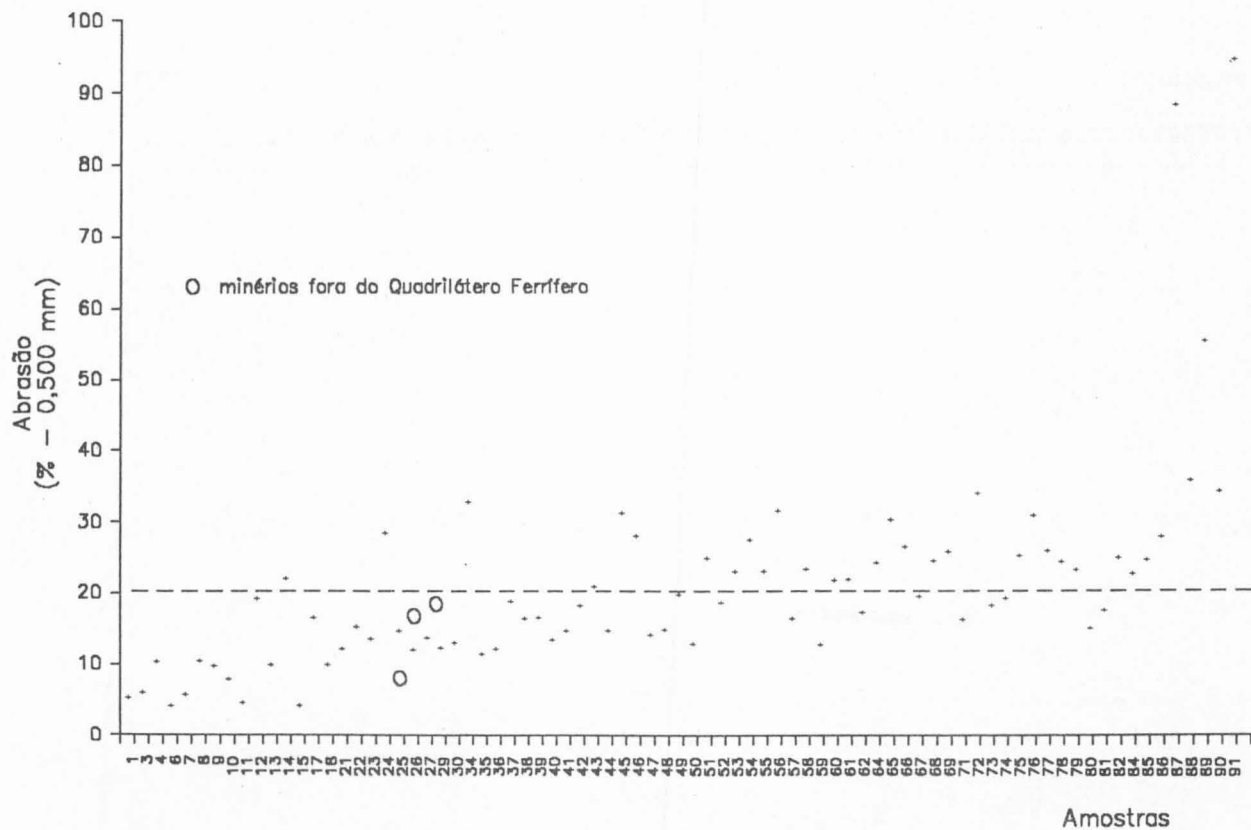


Figura 4 – Resultados dos ensaios de LTB procedimento SGA

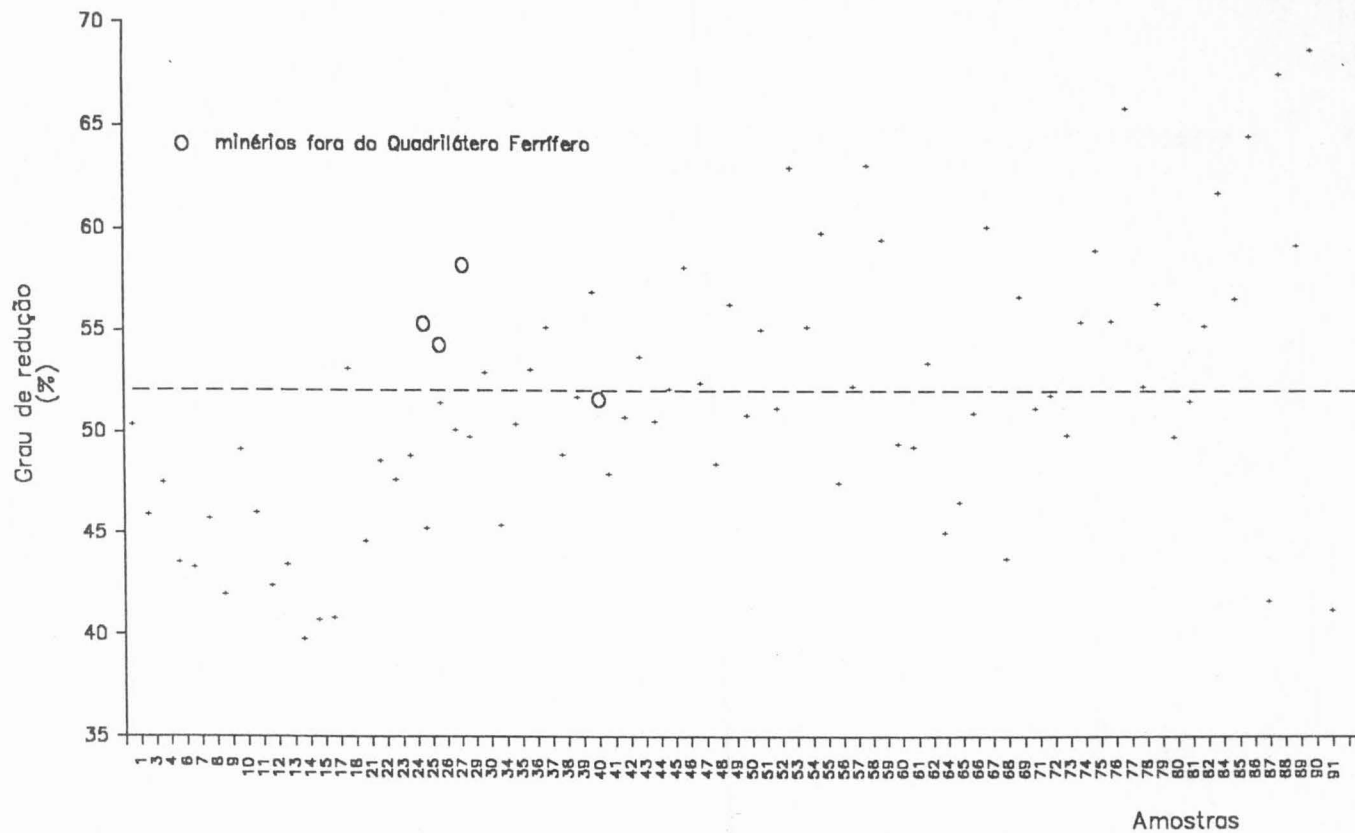


Figura 5 – Resultados dos ensaios de redução ISO 7215

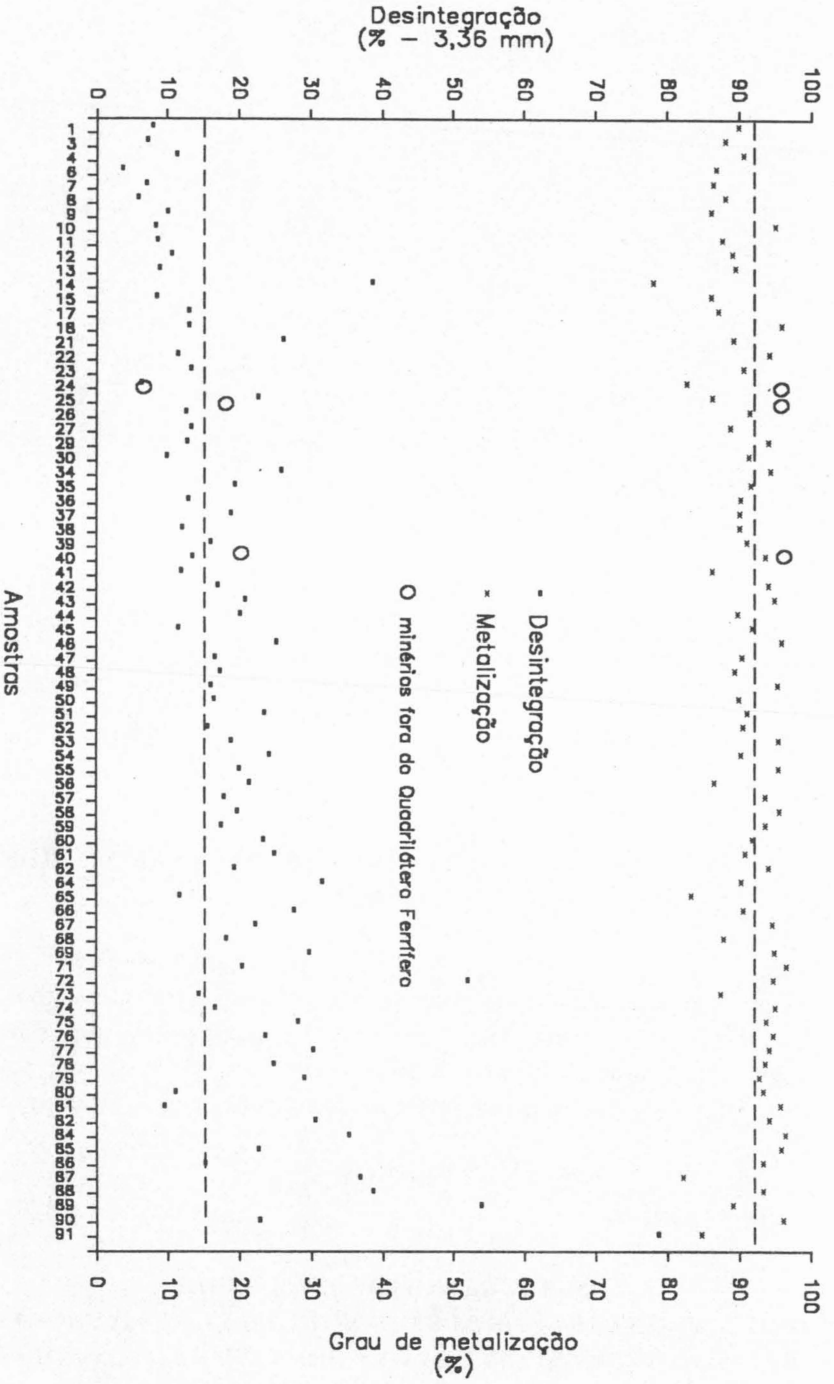


Figura 6 - Resultados dos ensaios de Midrex Linder Test

**MECHANICAL RESISTANCE AND METALLURGICAL QUALITY
PANORAMA OF LUMP IRON ORES FOR BLAST FURNACE AND
DIRECT REDUCTION PROCESSES**

Abstract

Lump ores from the Iron Ore Quadrangle of Minas Gerais were evaluated for blast furnace and direct reduction processes and had their quality compared with lump ores from Carajas, Urucum and Hamersley mineral provinces. Based on these data, correlation of mechanical resistance versus disintegration, reducibility and metallization indices was established.

KEY WORDS: IRON ORE - LUMP - EVALUATION