

AVALIAÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO PARA SINTERIZAÇÃO NA USIMINAS⁽¹⁾

Marco Aurélio { Carneiro⁽²⁾
Marcílio Braga { Cardoso⁽³⁾
Geraldo Timotheo da Rocha⁽³⁾

R E S U M O

É mostrada a metodologia empregada na USIMINAS para caracterização e avaliação de minérios de ferro a serem utilizados na sinterização.

São analisados o procedimento utilizado em escala piloto, a transposição dos resultados para máquina industrial e os resultados obtidos decorrentes de otimizações de mistura de sinterização.

-
- (1) Contribuição Técnica a ser apresentada no Seminário COMIN-COMAP - Porto Alegre, RS - setembro de 1987.
 - (2) Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista da Unidade de Metalurgia do Gusa da USIMINAS; Ipatinga, MG.
 - (3) Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista do Centro de Pesquisas da USIMINAS; Ipatinga, MG.

1. INTRODUÇÃO

Concebida inicialmente para aproveitamento de finos provenientes da preparação de minério granulado, a sinterização cresceu rapidamente de importância, sendo hoje fundamental para obtenção de elevadas produtividades e estabilidade operacional dos altos-fornos.

A produção de sínteres com boa qualidade física, química e metalúrgica e em elevados níveis de produtividade está diretamente relacionada com a qualidade dos minérios de ferro utilizados na mistura a sinterizar.

Os minérios de ferro são quase sempre avaliados através de sua composição química e granulométrica. A dificuldade de obtenção de um único minério, com qualidade e quantidade suficientes, conduz à adoção de uma mistura onde a um minério "base" são adicionados "corretivos".

A USIMINAS tem buscado continuamente a otimização da mistura de minérios, quer devido a modificações nas características destas matérias-primas, quer buscando uma melhor adequação do sínter para o alto-forno. Este trabalho conduziu a uma "mistura básica", atualmente utilizada, e ao desenvolvimento de uma metodologia para avaliação de minérios de ferro para sinterização. Basicamente esta metodologia consiste na caracterização química, granulométrica e mineralógica dos minérios, realização de ensaios em escala piloto de acordo com metodologia padronizada, e a confirmação das tendências em escala industrial.

Os resultados obtidos têm permitido segurança em alterações na mistura básica, decorrentes de modificações nos parâmetros de qualidade dos minérios e/ou utilização de minérios alternativos.

A otimização da mistura de minérios depende não apenas dos fatores acima enumerados como também de outras características tais como tamanho e forma do grão, poder de aglomeração a frio e hidratação, que afetam sensivelmente a sinterabilidade da mistura. A adoção de técnicas complementares de avaliação permitirá uma melhor previsão do comportamento dos minérios na sinterização, facilitando a definição das matérias-primas a serem testadas.

Pretende-se, portanto, neste trabalho, mostrar a metodologia de avaliação de minérios desenvolvida na USIMINAS e as perspectivas de aprimoramento desta técnica.

2. CARACTERÍSTICAS DO MINÉRIO DE FERRO PARA SINTERIZAÇÃO

2.1. Composição Química

A composição química da mistura de minérios de ferro para sinterização é definida para atender simultaneamente ao balanço de massa dos altos-fornos e à qualidade metalúrgica do sinter.

Para composição da mistura de minérios de ferro, visa-se na USIMINAS: $\text{SiO}_2 = 4,5 \sim 4,6\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,0 \sim 1,1\%$; $\text{P} \leq 0,045\%$ e $\text{FeT} \geq 64,0\%$. Os limites de controle para o SiO_2 foram estabelecidos a partir do volume de escória previsto para o sinter e da constatação que menores desvios-padrão de basicidade no sinter são obtidos quando não é necessário ajustar o teor de SiO_2 na mistura através do uso de fundentes específicos. Procura-se também evitar a utilização de minérios onde o SiO_2 esteja concentrado nas frações mais grossas (+1 mm), uma vez que neste caso nem todo ele participará das reações de sinterização, diminuindo o volume "real" de escória e fragilizando o sinter⁽¹⁾.

A principal restrição do Al_2O_3 na mistura de minérios está associada à sua distribuição nas diversas faixas granulométricas. Resultados industriais mostram que a concentração de Al_2O_3 nas frações finas dos minérios (-150 mesh) exerce forte influência negativa no RDI, conforme é mostrado na tabela I. A elevação do RDI quando da introdução de Al_2O_3 através das frações finas dos minérios pode ser explicada pelo fato da alumina participar mais intensamente nas reações de sinterização, dissolvendo-se na rede da hematita secundária e tensionando a sua estrutura⁽²⁾. O Al_2O_3 presente nas frações grossas praticamente não participa das reações de sinterização.

Quanto aos elementos minoritários presentes nos minérios brasileiros, a principal restrição é para o fósforo, cuja eliminação no alto-forno é de apenas 10% e limita sobremaneira a produção de aços mais nobres.

TABELA I - Distribuição do Teor de Al_2O_3 na Mistura de Minérios (USIMINAS) e sua Influência sobre o RDI. Al_2O_3 no sinter constante ($1,30 \pm 0,05\%$).

(%) Al_2O_3 no minério fino - A	(%) Al_2O_3 no minério rebitado - B	RDI no sinter (% -3 mm)
1,15	2,60	28,7
1,30	2,40	31,5
1,45	2,20	32,5
1,60	-	34,2
1,16	1,84	28,6
1,20	2,40	27,1
1,08	2,67	28,1

Resultados típicos: A $\left\{ \begin{array}{l} \% +1 \text{ mm} - 43 \\ \% -150 \text{ mesh} - 30 \end{array} \right.$ B $\left\{ \begin{array}{l} \% +1 \text{ mm} - 70 \\ \% -150 \text{ mesh} - 10 \end{array} \right.$

2.2. Granulometria

Para misturas constituídas basicamente por minérios hematíticos observa-se uma correlação direta entre sua granulometria e a produtividade da sinterização, desde que respeitados os limites de resistência mecânica do sinter⁽³⁾. Para minérios hidratados (limonítico/goethítico) esta correlação não é válida, embora a permeabilidade a frio da mistura seja em geral mais elevada para a mesma granulometria.

A figura 1 mostra resultados de variação de produtividade com a granulometria da mistura de minérios. Os dados industriais referem-se às variações para uma mesma mistura e os dados piloto para misturas compostas com diferentes minérios hematíticos. O ponto em destaque refere-se a uma mistura constituída por elevada proporção de minério hidratado.

2.3. Minérios hidratados e hematíticos

O comportamento anormal de misturas constituídas basicamente por minérios hidratados está ligado, entre outros fatores, à grande contração do bolo, acompanhada pela formação de trincas de grande tamanho. Estas trincas favorecem a passagem preferencial de ar, reduzindo a velocidade da frente de combustão e diminuindo o rendimento do produto pela elevação da formação de sinter frágil. A figura 2 mostra o esquema proposto por pesquisadores da Kawasaki para ilustrar o efeito de trincas grandes no rendimento do produto e conseqüente redução de produtividade.

A combinação de minérios hematíticos e hidratados, numa proporção adequada, permite a obtenção de misturas de melhor permeabilidade a frio, refletindo num menor tempo de sinterização, sem afetar o rendimento do produto. Contudo a proporção "ideal" de minério hidratado é função das características da mistura utilizada e dos parâmetros que se deseja otimizar.

Os resultados piloto e industrial da USIMINAS com proporção crescente de minério hidratado na mistura de sinterização estão mostrados na tabela II.

TABELA II - Variação nos parâmetros de sinterização com elevação da proporção de minério hidratado na mistura de sinterização da USIMINAS.

% de minério hidratado na mistura	TESTE PILOTO			RESULTADO INDUSTRIAL		
	Variação de Produtividade (%)	Consumo de Combustível (kg/t)	Retorno (%)	Variação de Produtividade (%)	Consumo de Combustível (kg/t)	Retorno (%)
20	95,7	56,7	30,6	94,3	52,6	26,5
40	100,0	55,4	29,3	100,0	57,0	29,7
60	99,0	54,3	29,1	92,4	57,1	29,8
80	87,8	54,3	29,4	-	-	-

Estes resultados indicam a existência de um nível máximo de produtividade e redução progressiva do consumo de combustível. A otimização da produtividade deve-se à interação da propriedade aglomerante dos minérios hidratados com a propriedade dos hematíticos de evitar a ocorrência de trincas. A redução no consumo de combustível, detetada apenas nos testes-piloto devido à variação no nível de retorno no teste industrial, está associada à maior facilidade de "fusão" dos minérios hidratados⁽⁴⁾. A variação da produtividade no teste industrial foi mais acentuada pelo fato de, na época da realização do teste, o minério hidratado apresentar-se mais fino.

A utilização de minério com maior facilidade de fusão, a despeito das vantagens na redução do consumo de combustível, é limitada devido à intensificação das reações de sinterização, que podem conduzir à deterioração da qualidade metalúrgica do sinter, especialmente o RDI⁽⁵⁾.

3. SISTEMÁTICA DE AVALIAÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO NA USIMINAS

3.1. Critérios gerais de seleção de minérios

A seleção de minérios que atendam determinadas características exigidas pela sinterização industrial é feita inicialmente através da consulta a um catálogo de minérios elaborado para esta finalidade. Nele constam informações sobre as principais propriedades dos minérios como composição química, granulometria e dados de sinterabilidade em escala piloto do minério isolado e/ou em adição a um minério-base. Constam também informações sobre as empresas de mineração como capacidade de produção, distância e possibilidade de transporte etc. Informações complementares são ainda obtidas nas reuniões periódicas de acompanhamento de qualidade com diversos fornecedores da sinterização industrial.

Após a definição dos minérios possíveis de serem utilizados, vem a etapa de testes de sinterização em escala piloto. A programação dos ensaios tem por referência, sempre que possível, a mistura básica em uso, obedecendo às características individuais dos minérios e às restrições de controle de pátios de estocagem (número de minérios, homogeneização e disponibilidade de área).

3.2. Testes de sinterização em escala piloto

A máquina piloto de sinterização, M.P.S., da USIMINAS possui as seguintes características:

diâmetro médio da panela = 290 mm;

altura da camada = 380 mm;

pressão de sucção durante a queima = 1.000 mmH₂O.

Nas condições padrão de operação da M.P.S. o retorno introduzido corresponde a 30% da mistura total e o combustível utilizado é o necessário para o balanceamento do retorno (retorno produzido = retorno introduzido). Para cada condição testada são realizadas três queimas com o mesmo percentual de combustível e que deverão ter, entre si, desvios máximos de um minuto no tempo de sinterização.

Na figura 3 é mostrado o esquema do tratamento do bolo de sínter, onde é simulada a degradação e manuseio a que o sínter industrial é submetido (britagem, peneiramento etc). Neste tratamento são produzidos os finos de retorno e coleta das as amostras para análise química e ensaios metalúrgicos.

Os resultados dos testes piloto de sinterização são bastante confiáveis pelo fato da simulação ocorrer sem redução de escala e, assim sendo, as tendências são facilmente reproduzidas. O estabelecimento de correlação precisa, no entanto, é dificultado pelo fato de a qualidade do sínter industrial ser mantida dentro de rígidos parâmetros de controle onde os desvios observados são, via de regra, decorrentes das variações normais dos testes de avaliação de qualidade. Entretanto, as correlações de produtividade, para elevados índices de resistência mecânica do sínter piloto, são precisas e permitem segurança na extrapolação direta dos resultados, como já evidenciado na figura 1. Para baixos índices de resistência mecânica do sínter ($S.I. \leq 86\%$), industrialmente a correlação de produtividade não se aplica de forma direta, uma vez que é necessária a redução da velocidade de máquina para controlar este parâmetro. Neste caso o balanço entre o controle da resistência e o ganho de produção é estabelecido empiricamente.

O consumo específico de combustível na M.P.S. é um pouco mais elevado devido às maiores perdas térmicas; no entanto, as tendências são reproduzidas na máquina industrial. A qualidade metalúrgica do sínter é reproduzida com boa precisão.

Como fator de segurança a avaliação de um novo minério é sempre feita através de sua introdução progressiva na mistura, substituindo os minérios pré-determinados. Este procedimento permite identificar possíveis erros de simulação.

O sínter de alto teor de TiO_2 , desenvolvido na USIMINAS, constitui exemplo marcante de aplicação dos resultados piloto em escala industrial. Este resultado é importante por se tratar de uma mistura de sinterização nunca utilizada em escala industrial, muito fina ($\% +1 \text{ mm} = 8\%$) e de baixo teor de ferro. Os resultados piloto e industrial correspondentes estão mostrados na tabela III^(6, 7).

TABELA III - Condições de operação e qualidade do sinter de alto teor de TiO_2 .

QUALIDADE DO SÍNTER PARÂMETROS DE SINTERIZAÇÃO	SÍNTER DE TITÂNIO		SÍNTER NORMAL	
	Piloto	Industrial	Piloto	Industrial
Densidade de Carga (t/m ³)	1,90	2,14	1,93	2,06
Produtividade (t/h.m ²)	0,87	1,03	1,40	1,50
Altura de camada (mm)	380,00	360,00	380,00	400,00
Retorno (%)	28,70	28,80	29,00	30,00
Coque fino (kg/t)	61,50	58,00	58,20	54,90
FeT (%)	46,80	48,22	57,30	57,60
FeO (%)	9,26	8,18	6,00	7,85
TiO ₂ (%)	10,70	8,54	0,12	0,10
(CaO/SiO ₂) i	1,76	1,60	1,67	1,64
RDI (% -3 mm)	33,10	27,30	31,40	30,30
Shatter Index (% +10 mm)	93,70	88,11	88,30	88,00
-5 mm no sinter	-	4,30	-	2,80

3.3. Teste Industrial

Para realização de um teste industrial (onde um minério A será substituído por um novo B), são indispensáveis várias providências iniciais, tais como: reserva de área de estocagem, adaptações na sistemática de blendagem ou preparação de silo na máquina de sinterização, ajustes na programação de recebimento de minérios etc.

Existem duas alternativas para realização de um teste industrial:

- utilização dos minérios A e B através do silo da sinterização, quando a proporção é pequena e/ou há necessidade de maior segurança;

- utilização dos minérios A e B através do sistema de homogeneização, quando a proporção é mais elevada e/ou os testes piloto conduziram a resultados muito vantajosos.

Em ambos os casos são utilizadas três pilhas homogeneizadas, com duração média de sete dias cada uma.

No teste via silo da sinterização a pilha homogeneizada é formada sem a parcela correspondente ao minério A que será substituído. Na primeira metade de consumo, o minério A é utilizado para complementação da pilha e para definição dos parâmetros de sinterização. Na segunda metade ocorre a sua substituição por B, que será utilizado até à metade da próxima pilha. Esta sistemática continua até a complementação do teste.

No teste via homogeneização cada pilha é dividida em duas partes (mini-

pilhas), sendo a primeira formada com o minério A e a segunda com o minério B, em teste. Em continuidade a primeira metade da segunda pilha é formada também com o minério B e assim sucessivamente até à totalização do teste.

Nas duas alternativas, os constituintes de cada pilha homogeneizada são mantidos em proporção constante e cada pilha é formada com matérias-primas de um mesmo lote, permitindo que as alterações detetáveis sejam provenientes apenas do minério em teste.

4. LIMITAÇÕES DA SIMULAÇÃO EM ESCALA PILOTO E POSSIBILIDADES DE APRIMORAMENTO DE CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE MINÉRIOS

4.1. Limitações

Apesar da boa confiabilidade dos resultados dos testes piloto e conseqüente segurança na realização de experiências para otimização da mistura industrial, algumas limitações são inerentes a esta metodologia:

- os testes são necessariamente repetitivos, ou seja, um mesmo minério necessita ser testado novamente diante de modificações introduzidas na mistura-base;

- as tendências observadas nos testes nem sempre podem ser explicadas através dos parâmetros medidos, devido, entre outros fatores, à interação do comportamento dos diferentes minérios e à própria alteração nas características do minério em função de mudança na frente de mineração.

As limitações acima enumeradas ficam críticas no momento em que se busca um refinamento na otimização de uma determinada mistura, uma vez que os ganhos tendem a ser progressivamente menores. Torna-se então necessário um conhecimento específico sobre permeabilidade a frio, influência da frente de combustão na variação da permeabilidade, da temperatura do processo na formação das fases mineralógicas do sinter etc.

Na figura 4 são mostrados os resultados operacionais dos últimos sete anos (1979 - 1986) das Sinterizações da USIMINAS (MS-2 e MS-3), onde se constata redução progressiva no consumo de coque e elevação da resistência mecânica do sinter para elevados níveis de produtividade, excetuando-se o período de 81/83 onde houve redução voluntária de produção. Em 1986 observa-se redução nos índices de produtividade. Neste período ocorreram alterações nas características dos minérios de ferro que conduziram a uma tendência de diminuição na resistência do sinter, corrigida com elevação no percentual de coque da mistura e redução na velocidade da máquina. A adoção de contramedidas, entre elas a elevação da granulometria da mistura de minérios (48 a

52% na fração +1 mm), não foi suficiente para impedir a queda na produtividade, indicando que outros fatores que não a granulometria dos minérios hematíticos, podem afetar o desempenho da sinterização.

Os testes em escala piloto, realizados na tentativa de corrigir a queda de produção, detetaram os mesmos problemas da mistura industrial, não tendo sido em contrada alternativa de correção, quer na mistura quer operacional. Isto ocorre devido às limitações das informações fornecidas neste tipo de simulação.

4.2. Possibilidades de aprimoramento

Estudos realizados na USIMINAS têm mostrado que para minérios isolados existe boa associação entre sua textura e o nível de produtividade. A figura 5 mostra texturas típicas de alguns minérios hematíticos e suas respectivas produtividades para uma mesma granulometria (testes piloto). Constata-se que a produtividade será tanto mais elevada quanto menor for o tamanho de grão e/ou mais rugosa a superfície. Para misturas de minérios existem interferências que não foram bem quantificadas e que não se pode, portanto, fazer extrapolações. A elevação de produtividade decorrente da mistura de minérios hematíticos e hidratados, descrita no item 2.3., constitui um exemplo dessas interferências.

Um ponto também importante e associado com a textura, diz respeito à fusibilidade dos minérios, ou seja, a facilidade de formação de fase líquida a partir da reação da hematita com os constituintes normais da mistura de sinterização. Esta maior ou menor capacidade de reação dos minérios determinará o nível de consumo de coque na mistura e a qualidade física e metalúrgica do sinter.

Além do estudo sistemático da textura dos minérios, vários ensaios específicos foram ou estão sendo desenvolvidos com o objetivo de suprir as deficiências de simulação em laboratório e facilitar a análise do comportamento dos minérios na sinterização. Entre estes ensaios podem ser citados:

- determinação da granulometria "aparente" da mistura⁽⁸⁾
- desenvolvimento de metodologia para medida da perda de pressão localizada no processo de sinterização. Estes ensaios devem permitir o acompanhamento da permeabilidade do leito antes, durante e após a passagem da frente de combustão. Resultados preliminares mostram que a perda de pressão na frente de combustão atinge, algumas vezes, valores superiores a 60% da perda total do leito, fato que evidencia a importância deste acompanhamento;
- desenvolvimento de metodologia para avaliação da fusibilidade de minérios e misturas, com o objetivo básico de adequação das matérias-primas visando otimização no consumo de combustível e na qualidade metalúrgica do sinter.

5. CONCLUSÕES

- A metodologia para avaliação de minérios de ferro para sinterização adotada na USIMINAS tem permitido a realização de testes em escala industrial com grande segurança quanto aos resultados previstos.
- A confiabilidade da metodologia adotada tem conduzido à realização sistemática de testes com novos minérios, buscando-se otimizar a mistura de sinterização. Como resultado, têm sido obtidos elevados níveis de produtividade (≥ 37 t/d.m²) com índices de qualidade química, física e metalúrgica superiores aos exigidos pelos altos-fornos e baixo consumo de combustível.
- A avaliação e especificação de minérios, segundo esta metodologia, deverá melhorar sensivelmente com a implementação dos ensaios complementares, uma vez que o comportamento dos minérios poderá ser previsto, diminuindo a necessidade de repetição de testes em escala piloto e/ou industrial.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem a colaboração do Eng^o Márcio Antonio de Azevedo, da Divisão de Sinterização e Matérias-Primas da USIMINAS, pelo apoio e sugestões apresentadas no desenvolvimento deste trabalho.

6. BIBLIOGRAFIA

1. SOMA, H. et alii - Studies on Melt Formation of Iron Ore Sinter and Application of Study Results to Pratical Operation. Proceedings of the 3rd International Symposium on Agglomeration - W. Germany, 1981.
2. ISHIKAWA, Y. et alii - Latest Development of Sintering Technology - Proceedings of the 2nd International Symposium on Agglomeration. USA, 1977.
3. CARNEIRO, M.A. et alii - Avaliação de Matérias-Primas e sua Influência na Produtividade da Sinterização. Meturgia ABM 40 (321): 429 - 433, AGO 1984.
4. SUGAWARA, K. - Sobre Características de reação do Sínter no Minério tipo Limonita (Desenvolvimento da Técnica de Controle de Fusão do Sínter - Relatório nº 1). Original Japonês, agosto 1980.
5. SASAKI, M. et alii - Consideration on the Properties of Sinter from the Point of view of Sintering Reactions. Tetsu-to-Hagané 68 : 563, 1982.
6. BRASIL; INPI; PI 8206553 - Processo para Proteção de Cadinho de Aparelho de Redução. 11 novembro 1982.
7. ROCHA, G.T. et alii - Desenvolvimento de um Sínter com alto teor de Titânio. Meturgia ABM 41 (326) : 25 - 28, janeiro 1985.
8. ARAÚJO FILHO, G.M. - Caracterização de Misturas para Sinterização. UFMG - Tese de Mestrado, dezembro 1984.

A B S T R A C T

The methodology for sintering iron ores characterization and evaluation employed at USIMINAS is shown in this paper.

The experimental procedure in sintering pilot plant, the results scale up and also the data carried out with sintering mixture optimization are analysed.

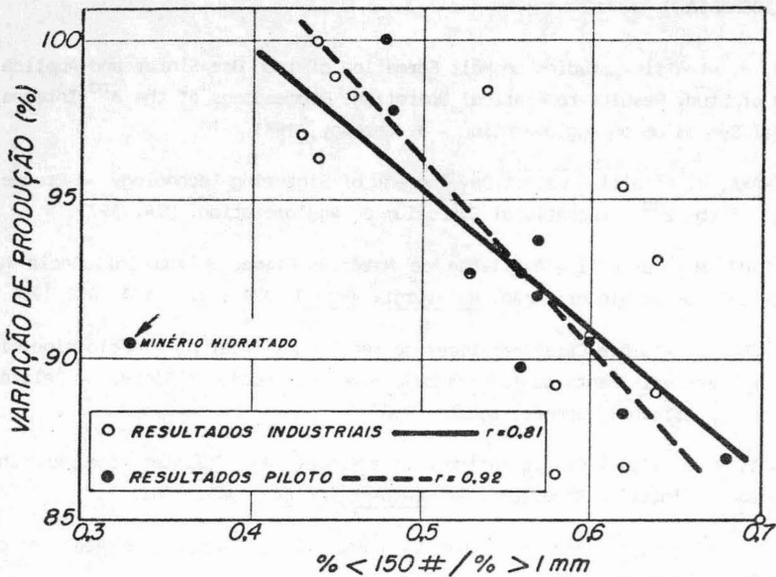


Figura 1-Variação da produtividade com a granulometria da mistura de minérios hematíticos.

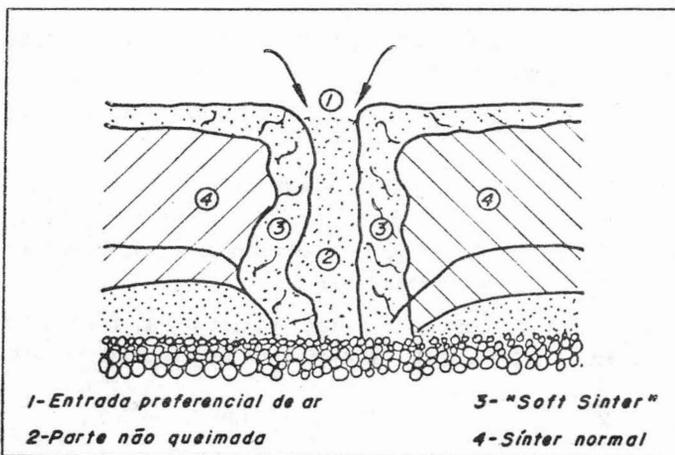


Figura 2-Esquema da região afetada por trinca no bolo de sinter.

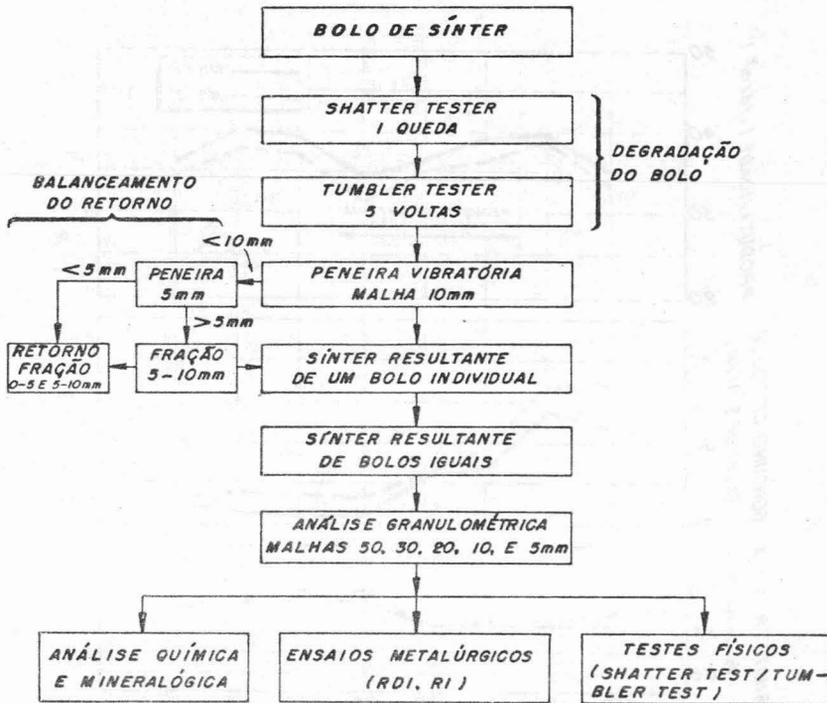


Figura 3-Fluxograma para tratamento do bolo de sinter – Testes piloto da USIMINAS.



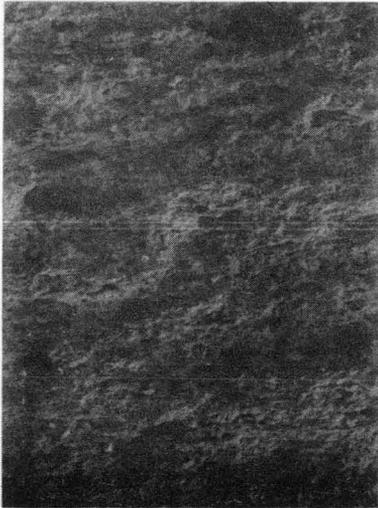
Figura 4 - Evolução dos dados operacionais nas sinterizações (MS-2 e MS-3) da USIMINAS - 1979 a 1986



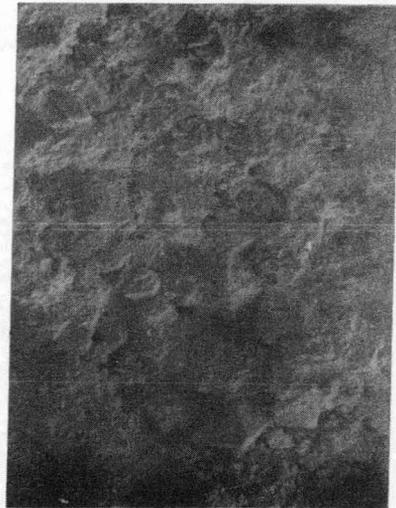
MINÉRIO A (P=*)
 NÃO SINTERIZA



MINÉRIO B (P=1,2)



MINÉRIO C (P=1,4)



MINÉRIO D (P=1,6)

P= PRODUTIVIDADE-t/h.m²

**Figura 5-Texturas típicas de minérios brasileiros hemag-
 tíficos (MEV-100X)**

