

CYRO TAKANO

Orientador: Carlos Luiz Brerch. (PMT)

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ALGUNS COMBUSTÍVEIS NA SINTERIZAÇÃO DE MINÉRIO HEMATÍTICO

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de "Doutor em Engenharia".

aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Êste trabalho teve a orientação constante e apoio irrestrito do Prof. Dr. Carlos Dias Brosch a quem o autor expressa seus agradecimentos.

Deve-se um especial agradecimento ao Prof. Dr. Tharcisio Damy de Souza Santos pelo constante estímulo, apoio e inúmeras sugestões durante todo o desenvolvimento dêste trabalho.

Agradece-se ao Prof. Dr. Francisco José Pinto de Souza pelas sugestões apresentadas na fase final do trabalho.

Menção especial deve ser feita aos Dr. Eng. David Gonçalves de Oliveira e Dr. Eng. Ivan G. S. Falleiros pela inestimável colaboração prestada na revisão do texto e ao Dr. Eng. Renato R. Vieira pela confiança e estímulo recebidos.

Deseja-se ainda externar os agradecimentos: à Companhia Siderúrgica Paulista pelo fornecimento do minério e carvão metalúrgico utilizados neste trabalho e ao Eng. Antonio Carlos Sarmiento, dessa Companhia, pela discussão dos problemas de sinterização; ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas por permitir a utilização da máquina Deval para determinação da intensidade de sinterização; aos estagiários do curso técnico, Antônio Luiz Carbonari e Luiz Carlos dos Santos pelos serviços auxiliares, principalmente na preparação das matérias primas; ao técnico Joaquim J. Pereira, da Escola Politécnica, na instalação dos equipamentos e serviços gerais de oficina mecânica; e a Nair de Sá pelos serviços de datilografia.

Trabalho realizado graças ao auxílio
da Fundação de Amparo à Pesquisa do
Estado de São Paulo.

Í N D I C E

	pág.
I - INTRODUÇÃO.	1
1. Considerações preliminares. Objetivo e justificativa da pesquisa.	1
2. Descrição sumária do processo	2
3. Variáveis do processo	6
4. Análise das variáveis	8
Características do minério de ferro	8
Características da carga de recirculação.	11
Características dos combustíveis.	12
Teor de umidade.	13
Modo de mistura	14
Modo de carregamento,	15
Condições de ignição.	16
Vazão específica de ar.	17
Condições de resfriamento	17
5. Índices de produção e de qualidade do sinter.	17
Produção unitária.	18
Resistência mecânica.	19
Redutibilidade.	20
6. Eliminação de enxôfre durante a sinterização.	21
II - MATERIAIS, APARELHAGEM E MÉTODOS.	23
1. Materiais utilizados.	23
2. Aparelhagem	29
3. Método empregado.	34
III - ENSAIOS PRELIMINARES.	37
1. Considerações gerais.	37
2. Primeira série dos ensaios.	37
Discussão dos resultados da primeira série.	41
3. Segunda série dos ensaios.	42
Discussão dos resultados da segunda série dos ensaios.	44

	pág.
4. Reprodutibilidade dos ensaios.	45
Reprodutibilidade da sinterização.	45
Reprodutibilidade do ensaio de intensidade de sinterização.	47
 IV - EXPERIÊNCIAS SISTEMÁTICAS.	 48
1. Condições adotadas nas experiências sistemáticas	48
2. Estimativa da umidade ótima.	48
3. Experiências realizadas com coque e seus resulta <u>ta</u> dos.	51
4. Experiências com carvão metalúrgico e seus resul <u>ta</u> tados.	53
5. Experiências com carvão vegetal e seus resulta <u>ta</u> dos.	57
6. Algumas experiências para obtenção de sínter se- mi-reduzido.	59
 V - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.	 60
1. Reprodutibilidade dos ensaios.	60
2. Variação do volume específico aparente com a umi <u>da</u> dade.	60
3. Comparação dos combustíveis utilizados.	63
4. Mistura das cargas feitas de maneiras diferentes	66
5. Efeito da variação de umidade na carga no inter- valo de mais ou menos 0,5%	68
6. Teores de óxido ferroso e de enxôfre nos sínters	70
7. Vazão específica de gases de exaustão.	72
8. Sínter semi-reduzido.	73
 VI - CONCLUSÕES.	 75
 VII - BIBLIOGRAFIA.	 77

CAPÍTULO I

I N T R O D U Ç Ã O

I - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES. OBJETIVO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.

A sinterização de finos de minério de ferro é utilizada já há mais de 5 decênios, embora o maior impulso tenha-se verificado na década de 1950-1960. No Brasil, a Companhia Siderúrgica - Belgo Mineira foi a pioneira nesses estudos, já em 1938⁽¹⁾.

A literatura cita trabalhos analisando inúmeros fatores no estudo da sinterização, seja quanto aos tipos de equipamentos, às variáveis do processo, às variáveis da mistura a sinterizar, às variáveis do sinter produzido, até recente estudo sobre sinterização semi-redutora⁽²⁾ (§).

Na presente tese o autor propõe-se a analisar o efeito - das variações de algumas características dos combustíveis na sinterização de minério de ferro. Com o levantamento das curvas térmicas (curvas de evolução da temperatura com o tempo, num determinado ponto do interior da carga) o autor pretende analisar certos efeitos das matérias voláteis, da cinza e da reatividade dos combustíveis. Serão, também, verificados os efeitos de pequenas variações de umidade na sinterização, tendo em vista que, em unidades de operação contínua de sinterização, os recentes métodos adotados para controle da umidade da mistura a sinterizar (tais como por sonda de neutrons e baseado na resistividade elétrica da car-

(§) Na obtenção de sinter semi-reduzido foram utilizados finos de minério de ferro menores que 2 mm e contendo 27% de frações menores que 0,044 mm, combustível de granulometria inferior a 0,6 mm e contendo 32,5% de frações menores que 0,044 mm, e o autor citado⁽²⁾ empregou o processo de pré-pelotização.

ga) permitem avaliar o teor de umidade com sensibilidade dentro da faixa de 1%, isto é, com desvio de mais ou menos 0,5%⁽³⁾,⁽⁴⁾. Além do coque, que é o combustível normalmente empregado na sinterização, foram utilizados o carvão metalúrgico de Santa Catarina e o carvão vegetal (de eucalipto). Ênfase maior foi dada ao carvão metalúrgico, por razões que são justificadas logo adiante. O "carvão metalúrgico" de Santa Catarina, é o principal produto do beneficiamento do carvão mineral betuminoso das jazidas desse Estado, para emprêgo na produção de coque, geralmente em mistura com outro carvão importado da mesma categoria.

Julgou-se que a possibilidade de aproveitamento desse carvão metalúrgico (não coqueificado) na sinterização, mormente com o encarecimento do carvão importado, ora verificado, poderá representar uma nova solução aos problemas siderúrgicos nacionais, tanto sob ponto de vista econômico, como estratégico e social. Além disso, o desvio de uma parcela do carvão metalúrgico nacional para a sinterização, dentro do critério da mistura com determinada quota de carvão importado, permitirá a operação dos altos fornos com coque de melhor qualidade.

2 - DESCRIÇÃO SUMÁRIA DO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO

Deve-se distinguir pelo menos dois conceitos básicos diferentes quando se fala no processo de sinterização: 1) o processo de sinterização de pós metálicos ou de óxidos e 2) o processo de sinterização de minérios ou concentrados que tem o objetivo de aglomerar e/ou calcinar e/ou ustular e/ou secar.

Neste trabalho, o autor trata especificamente da sinterização de minérios de ferro com o objetivo principal de aglomeração.

O processo de sinterização consiste basicamente nas seguintes etapas: dosagem, mistura da carga, carregamento do forno, sinterização propriamente dita e resfriamento do sinter. A sinterização propriamente dita inicia-se com a ignição da parte superior da carga e prossegue com a queima do combustível, com excesso de ar aspirado, propagando-se para as camadas inferiores subsequentes até atingir a camada suporte.

Pode-se distinguir, na seção vertical de uma carga em processamento de sinterização, num determinado instante, quatro zonas principais^(5,6,7), de baixo para cima, nos fornos usuais de sinterização ditos descendentes:

- 1) uma zona fria e úmida constituída da mistura inicial e, eventualmente, de matérias voláteis condensados;
- 2) uma zona de rápido aquecimento (da carga), onde se dá a secagem, a desidratação e início de calcinação;
- 3) uma zona de alta temperatura em que se efetua a combustão de carbono, a dissociação dos carbonatos, a ustulação de sulfetos, a redução parcial dos óxidos e a fusão parcial da carga, com formação de novas estruturas. Esta zona pode ser distinguida em regiões redutora e oxidante; e
- 4) uma zona de resfriamento com reoxidação e rescritalização do minério no aglomerado.

Os aspectos fundamentais da sinterização, compreendem assim: percolação gasosa através das camadas sólidas, transferência de calor gás-sólido, queima do combustível, reações químicas (inclusive as de redução e reoxidação), fusão e solidificação⁽⁸⁾.

Sob o aspecto de desenvolvimento das "ondas térmicas" WSCIEKLICA⁽⁹⁾ e BOUCRAUT e ROCHAS^(7,10) julgam importantes o fenô

meno de transmissão de calor desde o nível superior até o nível inferior da carga, desenvolvendo uma "onda térmica de transmissão", e o fenômeno da queima do combustível sólido desenvolvendo uma outra "onda térmica de combustão". A associação dessas duas "ondas" dá a "onda térmica global" característica. Afirmando esses autores que a coincidência na velocidade de propagação das duas "ondas térmicas formando uma "frente térmica única" é desejável e determinaria nessas condições, a velocidade ótima de sinterização. Esta velocidade ótima define, para uma dada altura de carga, o consumo térmico mais favorável e as melhores características do aglomerado. Este comportamento, formando uma "frente térmica única", é também função das variáveis do processo, principalmente da reatividade e do teor de combustível na carga, da permeabilidade de carga e difusibilidade térmica (condutibilidade e capacidade térmica) do material.

Os mecanismos de ligação das partículas na sinterização de minérios podem se dar por difusão e recristalização, reoxidação e por formação de escórias.

Os mecanismos de ligação das partículas por difusão e recristalizações são, teoricamente, os desejáveis, pois o sinter seria poroso e no caso de redução por gases haveria exposição direta do óxido de ferro aos gases redutores. Sabe-se, entretanto, que a participação desse mecanismo é relativamente pequena a temperaturas inferiores a 1300°C ⁽¹¹⁾. Mesmo a temperaturas acima de 1300°C , durante o tempo de 1 a 2 minutos, como ocorre normalmente em sinterizações, as partículas são insuficientemente ligadas por esse mecanismo, para apresentar boa resistência mecânica. Na prática normal, a mistura contém constituintes que apresentam baixa temperatura de fusão e, assim escorificam antes que a difusão no estado sólido torne-se significativa. A participação desse mecanismo é importante somente quando são sinterizados minérios ou concentrados extre-

mamente puros. Os minérios brasileiros, em geral bastante puros, podem necessitar de temperaturas muito altas, até da ordem de 1600°C ⁽⁵¹⁾.

Na ligação por formação de escória apenas a ganga (cal, sílica, óxidos alcalinos, etc.) toma parte, inicialmente, na formação de escória e, com o aumento da temperatura, há uma dissolução de óxido de ferro⁽¹¹⁾. Em temperaturas elevadas há possibilidade de formação de cristais de silicatos de ferro de difícil redução posterior. COHEN⁽¹¹⁾ afirma que, quando a temperatura máxima de sinterização não é suficientemente alta, o óxido de ferro dissolvido na escória precipita-se como magnetita numa matriz de escória solidificada. Assim um sinter aglomerado por êste mecanismo apresenta, fundamentalmente, três tipos de materiais:

- 1) mineral original;
- 2) constituintes do mineral original que sofrem recristalização durante ou após a sinterização; e
- 3) constituintes secundários, resultantes da fusão e/ou dissolução do material durante a sinterização, que podem ser distinguidos em dois grupos: a) constituintes que permanecem dissolvidos na escória e b) constituintes que se precipitam durante a solidificação.

Aceita-se atualmente⁽¹²⁾ que a causa da boa resistência do sinter é a escorificação. Baseando-se nêste mecanismo, um sinter de boa resistência mecânica e de boa redutibilidade seria obtido com temperaturas apenas suficientes para fundir os constituintes da ganga e/ou adições de outros constituintes formadores da escória, e manutenção dessas temperaturas por um tempo curto para minimizar a dissolução do óxido de ferro. Verifica-se assim que a teoria de BOUCAUT e ROCHAS⁽⁷⁾ sôbre "frente térmica única" identifica-se com êste mecanismo.

Outro mecanismo é o de oxidação e/ou reoxidação. A oxidação da magnetita ocorre em temperaturas acima de 500°C com velocidade alta e preferencialmente em certos planos cristalográficos⁽²⁾, formando uma nova estrutura cristalina. Este mecanismo é tão importante em minérios magnetíticos (oxidação) como em minérios hematíticos puros (reoxidação), onde a escorificação é insuficiente.

3 - VARIÁVEIS DO PROCESSO

Todos os autores são unânimes em admitir que a permeabilidade é um dos parâmetros mais importantes na sinterização de minérios; ela é função, principalmente, das variáveis de carga: distribuição granulométrica e forma das partículas dos componentes da carga, teor de umidade, teor dos componentes e métodos de mistura.

As variáveis de operação são principalmente: modo de carregamento, modo de ignição, altura da camada a sinterizar, depressão sob grelha, pré-aquecimento da carga e do ar, queima suplementar de combustível líquido ou gasoso e sôbre-pressão no topo da carga e na grelha.

Outras variáveis são: composição química e mineralógica dos componentes da mistura a sinterizar e combustividade e reatividade do combustível.

Dada a importância da permeabilidade da carga a sinterizar, VOICE, BROOKS e GLEDHILL⁽¹³⁾ propuseram uma maneira prática de medi-la, segundo a expressão:

$$P = \frac{Q}{A} \left(\frac{h}{s} \right)^n$$

sendo:

P = permeabilidade, em BPU (British Permeability Unit)

Q = vazão dos gases a 15,6°C e 760 mmHg, em pés³/min

h = altura da carga, em polegadas

s = sucção efetiva, em polegadas de água

A = área de grelha, em polegadas²

n = expoente determinado experimentalmente (para o caso de sinterização de minérios de ferro pode ser tomado como sendo 0,60). Varia muito pouco com o tipo de material e com o avanço do processo de sinterização.

VOICE e outros⁽¹³⁾ distinguiram três permeabilidades diferentes: 1) permeabilidade antes da ignição; 2) permeabilidade mínima após a ignição e 3) permeabilidade média durante a operação.

Sabe-se⁽¹⁴⁾ que a permeabilidade mínima após a ignição e a permeabilidade média são índices que apresentam boa correlação com a produção e a qualidade do sinter. Misturas bastante úmidas podem dar elevada permeabilidade antes da ignição porém, que pode diminuir rapidamente após a ignição, em função do grau de intensidade do colapso parcial da carga, do grau de combustão da carga e do grau de redução parcial de óxidos.

Adotou-se, no presente trabalho, a medida da permeabilidade tal como definida por VOICE e outros⁽¹³⁾ e já consagrada na literatura técnica internacional. Fêz-se a devida conversão de unidades para o sistema métrico, definindo-se, portanto, a Unidade Métrica de Permeabilidade (UMP), conforme segue:

$$P = \frac{Q}{A} \left(\frac{h}{s} \right)^{0,6}$$

onde:

P = permeabilidade, em UMP

Q = vazão de gases a 15,6°C e 760mmHg, em m³/min

A = área de grelha, em m²

h = altura da carga, em cm

s = sucção efetiva, em cm de coluna de água.

Fêz-se a escolha conveniente de unidade para que o valor numérico do resultado situasse na faixa de 0 a 60, que apresentas se boa sensibilidade e que fosse fácilmente comparável com os resultados da literatura internacional.

O fator de conversão de unidades, segundo a definição é
 $UMP = 0,305 \text{ BPU}$.

4 - ANÁLISE DAS VARIÁVEIS

CARACTERÍSTICAS DO MINÉRIO DE FERRO

Quanto à distribuição granulométrica e forma das partículas, sabe-se⁽⁶⁾ que, de forma aproximada, a permeabilidade varia proporcionalmente com o inverso do quadrado da superfície específica. Sob essas condições, seriam desejáveis grãos esféricos de maior diâmetro possível e de tamanho uniforme. Entretanto, a permeabilidade excessiva piora o efeito do contato superficial gás-sólido e, portanto, a transmissão de calor e difusão de oxigênio⁽¹⁴⁾; conseqüentemente, haverá diminuição de eficiência na utilização de ar e da velocidade de sinterização. Melhores condições de sinterização são obtidas com partículas compreendidas entre 0 e 6mm^{(§)(15)}, com formas chatas e alongadas, e tais que a porcentagem das partículas menores que 0,147mm (100 "meh") situe-se em torno de 10%⁽⁶⁾.

Para um determinado minério, BATES⁽¹⁶⁾ mostrou que melhor resistência do sinter pode ser obtida com finos de minério de ferro menores que 3 mm. Este autor não fornece a análise granulométrica dos finos, mas valores de permeabilidade (da ordem de 35UMP)

(§) refere-se, neste trabalho, sempre, às dimensões das aberturas das peneiras de malhas quadradas.

indicam que a porcentagem de finos menores que 0,147 mm não deve ultrapassar os 10%.

Já outros autores⁽⁷⁾ encontraram máxima velocidade de sinterização utilizando-se finos de minério compreendidos entre 0,5 a 8 mm.

ASTIER⁽¹⁷⁾ julga preferível que o teor de fração menor que 0,3 mm seja da ordem de 10% recomenda a composição granulométrica da mistura a sinterizar conforme a Fig. 1.

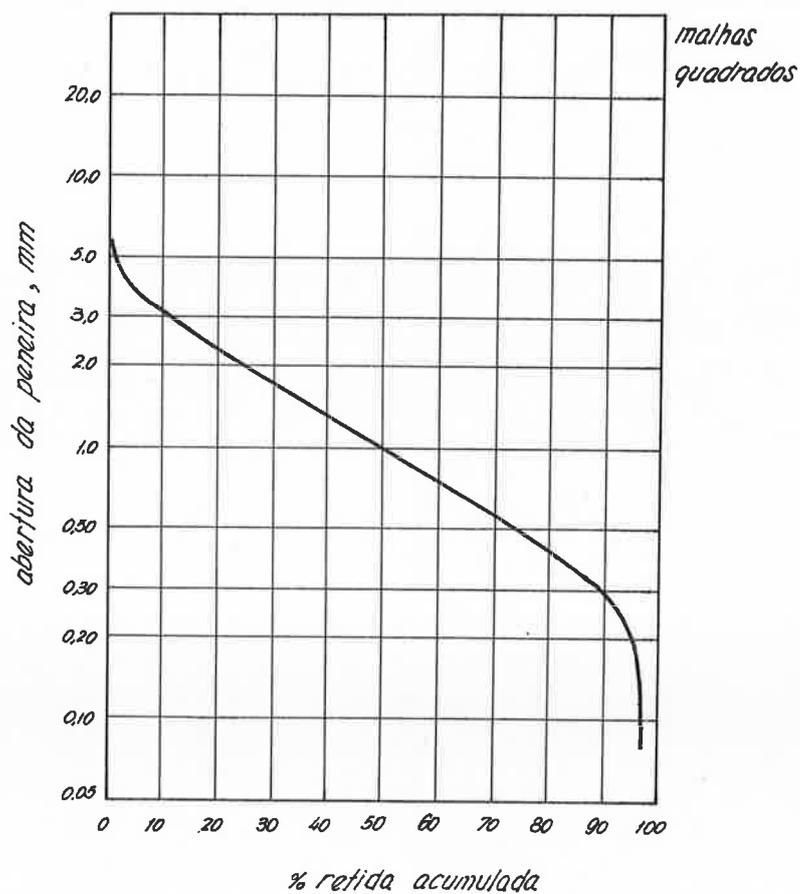


Fig. 1 - Exemplo de análise granulométrica ótima para sinterização de minérios de ferro (ref. 17).

Quantidade excessiva (maior que 20%) de finos menores que 0,147mm (100 "mesh") pode ser contornada com uma pré-pelotização - parcial, tomando-se apenas frações menores que 3mm⁽¹⁸⁾ ou apenas as frações menores que 0,147mm (100 "mesh")⁽¹⁴⁾.

A permeabilidade da carga é afetada também pelo poder aglomerante dos finos do minério, que é outra variável do processo. O poder aglomerante está diretamente relacionado com a natureza mineralógica dos constituintes do minério⁽⁷⁾. Em geral, os minerais do tipo limonita-goetita possuem uma boa porosidade interna e respondem bem à micropelotização^(§), apresentando portanto um elevado poder aglomerante, contrariamente aos minerais do tipo hematita, que são bastante compactos e que apresentam poder aglomerante reduzido⁽⁷⁾.

As composições químicas e mineralógicas afetam principalmente o mecanismo da aglomeração e as propriedades do sinter, além, do já citado poder aglomerante. A presença de sílica e alumina pode contribuir para ligações fortes entre partículas, ligações estas do tipo cerâmico. A sílica pode, ainda, formar, durante a sinterização, acima de 800°C e na ausência de óxido de cálcio, a faialita, de difícil redutibilidade por gases. A alumina favorece a formação da faialita e, nas temperaturas acima de 1.050°C, a formação da hercinita (também de difícil redutibilidade por gases)⁽¹⁹⁾. A presença de óxido de cálcio com relação CaO/ SiO₂ maior ou igual a 2 libera todo "FeO" dos silicatos complexos⁽⁴⁷⁾. Na obtenção de um sinter básico, além de evitar a formação de silicatos complexos de óxidos de ferro, melhora-se a resistência mecânica, a redutibilidade e a produtividade⁽¹²⁾. Nesta operação é preferível a adição de cal em vez de calcáreo^(11,20). Contribuição mais recente⁽⁷⁾ indi-

(§) Entende-se por micropelotas as pelotas de dimensões milimétricas (1 a 3 mm). O termo será mantido por estar já consagrado na literatura.

ca que a adição de cal aumenta a velocidade de sinterização, também pelo fato do hidróxido de cálcio (que se forma com a adição de água) ser higroscópico e, como tal, reduz o efeito do encharcamento da carga nas camadas inferiores devido à condensação de água. A adição de cavacos finos,⁽²¹⁾ assim como de carepa de laminação,⁽²²⁾ influi no mecanismo da sinterização, principalmente, pelo efeito da reoxidação.

CARACTERÍSTICAS DA CARGA DE RECIRCULAÇÃO

A carga de recirculação, na siderurgia, geralmente se constitui de finos de retôrno. Os finos de retôrno são constituídos de materiais que não aglomeraram durante a sinterização e das partículas de sínter de dimensões pequenas (que não servem para utilização direta no alto forno); atualmente, adota-se como finos de retôrno as partículas que passam na peneira com abertura de 5 a 6mm após a operação de sinterização^(36, 38, 39).

As mesmas considerações feitas para o minério podem ser estendidas para os finos de retôrno. Alguns autores⁽²³⁾ admitem que a porosidade intrínseca dos finos de retôrno favorece a permeabilidade, desde que se controlem as condições de mistura, evitando a adesão das partículas finas sobre as partículas constituintes de finos de retôrno. Os finos de retôrno contribuem, também, na formação das pelotas, funcionando como núcleos por apresentar um formato todo irregular, com alta superfície específica. Tem-se notado que pelotas assim formadas apresentam resistência mecânica a verde bem superior às demais⁽²⁴⁾.

CARACTERÍSTICAS DOS COMBUSTÍVEIS

VOICE e outros⁽¹⁵⁾ afirmam que o tamanho das partículas dos combustíveis não afeta muito a permeabilidade, desde que se controle a umidade. Embora êsses autores não citem, entende-se que a afirmação é válida para granulometrias normalmente utilizadas na sinterização, com distribuição aproximadamente normal entre 0 e 5 mm. WENDERBORN⁽²⁵⁾ cita que o tamanho do combustível deve ser menor que 3 mm, pois, utilizando-se frações menores que 3 mm, além de diminuir o tempo de sinterização, há uma considerável economia do mesmo. MIYAGAWA⁽²⁶⁾ mostrou nas suas experiências que bons resultados podem ser obtidos, com tamanhos de coque compreendidos entre 0,5 e 2 mm (32 e 9 "mesh"); êle obteve maior produtividade com tamanhos na faixa superior e melhor resistência mecânica na faixa inferior. BOUCRAUT e ROCHAS⁽⁷⁾ chegaram à conclusão de que a granulometria ótima que o coque deve possuir é de 0,5 a 3 mm. Neste trabalho, para o estudo comparativo de três combustíveis (carvão vegetal, carvão metalúrgico de Santa Catarina e coque) adotaram-se frações granulométricas compreendidas entre malhas quadradas de aberturas 0,841 a 2,20 mm.

É de esperar que, devido às diferenças de reatividades dos combustíveis, as propagações ótimas das "ondas térmicas" preconizadas por BOUCRAUT e ROCHAS⁽¹⁰⁾ certamente serão diferentes. DIXON⁽²⁷⁾ concluiu que, em geral, combustíveis de reatividade maior que a do coque apresentam tendência pronunciada para aumentar a relação CO/CO_2 nos gases, diminuindo assim a eficiência térmica.

Portanto, seria interessante que o combustível para sinterização apresentasse baixa reatividade, baixo teor de matérias voláteis, baixo teor de cinzas e um tamanho máximo de 5 mm e mínimo de finos menores que 0,5 mm.

TEOR DE UMIDADE

Segundo VOICE e outros⁽¹⁵⁾, a água interfere na permeabilidade, permitindo adesão das partículas finas sobre as maiores e também micropelotizando os finos. Adição excessiva de água faz com que a parte viscosa, constituída finos úmidos, torne-se mais fluida, perdendo, assim, as propriedades ligativas e empastando a mistura. Percebe-se portanto que existe, para cada tipo de mistura, dependendo das características dos componentes, uma umidade que corresponde à máxima permeabilidade de carga durante a sinterização. A êste teor de água denomina-se "umidade ótima". Outras variáveis que podem afetar a "umidade ótima" são: modo de mistura e maneira como é adicionada a água.

Diversos são os autores que estudaram o efeito do teor de água na sinterização e, entre êles, os citados nas referências (13,15,16,28,29). VOICE e outros⁽¹⁵⁾ correlacionaram o teor de água diretamente com a permeabilidade, conforme definida no ítem (3) dêste capítulo. Nas sinterizações convencionais, com minérios de ferro de granulometria usual, outra maneira de determinar a umidade ótima é a de correlacionar o teor de água com o volume específico aparente da mistura, em que o volume específico máximo corresponde à umidade ótima^(28, 30). Pode-se notar no trabalho de GLEDHILL e LANG⁽³¹⁾ que o volume específico aparente relaciona-se perfeitamente com a permeabilidade mínima após a ignição, para as sinterizações normais, no caso específico dos materiais empregados por êsses autores. A determinação da umidade ótima a partir do máximo volume específico aparente oferece a vantagem de ser extremamente prática; no entanto, êste método não é recomendado para misturas que podem entrar em colapso nas camadas inferiores da carga, como acontece frequentemente com as misturas pré-pelotizadas⁽¹⁴⁾.

Como a umidade ótima corresponde a 50 a 60% da umidade de saturação⁽³²⁾, seu valor pode ser determinado através desta, que corresponde à quantidade máxima de água que pode ficar absorvida na mistura. Na prática, obtem-se este índice encharcando-se a amostra seca e deixando-se escorrer a água em excesso num funil. Quando termina o gotejamento faz-se a determinação do teor de umidade (de saturação)⁽³²⁾.

BATES⁽¹⁶⁾ julga que umidade ótima é aquela em que se condiciona a mistura para dar menor variação possível na permeabilidade (antes e mínima após a ignição) e o teor de umidade seria um pouco menor do que o que confere maior volume específico aparente.

MODO DE MISTURA

A maneira como é feita a mistura pode influir na permeabilidade da carga. As misturas bem fôfas, que conferem boa permeabilidade inicial, nem sempre são desejáveis, dependendo das características dos seus componentes. Nem tampouco as misturas adensadas por rolos amassadores flutuantes são convenientes. Para o caso de finos de minério com frações granulométricas menores que 0,147mm excedendo a faixa dos 10%, as misturas feitas em tambores rotativos são mais recomendadas, pois a utilização desse tipo de misturador permite obter finos relativamente aderentes às partículas maiores e com leve grau de pelotização. Neste caso não se verifica um adensamento da carga no início da sinterização.

Uma outra técnica de mistura é a de pelotizar os finos sem combustível, o qual é adicionado somente no estágio final da mistura. Segundo GRICE e DAVIES⁽³³⁾, essa técnica imprime boa permeabilidade, aumentando a produtividade, e o sinter assim obtido apresenta qualidades comparáveis aos obtidos pela técnica usual. Ês

te aumento de produtividade, provavelmente, não é devido apenas à maior permeabilidade, mas também, por causa de um melhor aproveitamento do ar. Neste caso, a velocidade de propagação da "onda térmica de combustão" poderá ser maior que a de "transmissão de calor". Uma técnica semelhante, isto é, com adição de combustível somente na etapa final da mistura, porém, sem pré-pelotização, foi desenvolvida por LEBEDEV⁽³⁴⁾, que afirma conseguir maior velocidade de sinterização e melhor qualidade do produto com este processo.

A adição de finos de retórno só na etapa final da mistura também parece apresentar vantagens. Segundo YATSUNAMI⁽²³⁾ a principal vantagem deve-se ao fato de aproveitar ao máximo a porosidade intrínseca destes finos de retórno. Nas misturas feitas normalmente, os finos aderem às partículas constituintes do retórno, impermeabilizando-as. O fato de se aproveitar esta propriedade (porosidade intrínseca) dos finos de retórno torna a mistura mais insensível às variações de umidade no que se refere à permeabilidade⁽²³⁾. O autor citado⁽²³⁾ mostrou que nas proximidades da umidade ótima a permeabilidade permanece praticamente constante mesmo com variações de até 2% de água.

Outras variáveis, tais como, massa total da carga, tempo e maneira como é feita a adição de água podem, também, alterar as características da mistura.

MODO DE CARREGAMENTO

Dependendo da maneira como é carregado o aparelho de sinterização, pode-se variar a permeabilidade e a homogeneidade da carga. A homogeneidade é afetada normalmente pela segregação das partículas maiores junto às paredes, resultando um sinter heterogêneo. A heterogeneidade também afeta a permeabilidade da carga, a

lém do estado de compactação da carga no ato do carregamento.

O carregamento em duas ou mais camadas não é, em geral, utilizado, apesar de apresentar melhor aproveitamento do combustível, obtenção de um sinter homogêneo e aumento da produção⁽¹⁵⁾, devido às dificuldades inerentes desta operação, que encarecem o processo. Estas dificuldades, no entanto, perdem importância no caso dos minérios sideríticos, devido à técnica de carregamento na parte inferior do forno com o material a calcinar⁽³⁵⁾.

Existe um compromisso entre a economia de combustível e a produtividade, em relação à altura da carga da camada a sinterizar. Menor altura da camada a sinterizar melhora a permeabilidade, porém diminui a velocidade de propagação da onda térmica⁽¹⁵⁾ e maior é a perda térmica. Alturas maiores permitem melhor aproveitamento térmico, porém com menor produtividade⁽⁷⁾.

CONDIÇÕES DE IGNIÇÃO

BATES⁽¹⁶⁾, trabalhando com carga constituída de finos de minério predominantemente menores que 6 mm e utilizando gás de coqueria e uma mistura gasosa com poderes caloríficos de 4.150 e 1.470 kcal/m³ respectivamente, mostrou que a intensidade ótima da ignição numa sinterização normal é obtida quando, na queima, o combustível libera calor da ordem de 9.500 a 11.000 kcal/min.m² de grelha. O mesmo autor⁽¹⁶⁾ concluiu também que é desejável a queima com leve excesso de ar e que o calor total desejável para ignição depende das propriedades físico-químicas dos constituintes. É necessário um controle mais rigoroso quando os constituintes da carga contêm água de hidratação ou carbonatos. Misturas pré-pelotizadas, contendo teores elevados de umidade, também necessitam de maior intensidade de ignição. Não se pode aplicar o resultado aci-

ma para técnica em que se faz uso do ar ou minério pré-aquecidos.

VAZÃO ESPECÍFICA DE AR

A vazão específica de ar é uma variável dependente principalmente das características do exaustor e da permeabilidade da carga. O aumento da vazão de ar eleva o pico de temperatura e aumenta a velocidade de sinterização⁽²⁵⁾. Entende-se que a argumentação é válida para misturas que não sejam excessivamente permeáveis a ponto de tornar ineficiente a troca de calor gás-sólido por unidade de volume e, portanto, permitindo que o ar não suficientemente quente atinja a frente de combustão. São importantes, também, as condições atmosféricas, principalmente a umidade relativa e a temperatura do ar. O ar saturado de umidade condensa, nas camadas inferiores, toda a água vaporizada nas camadas superiores da carga. O consumo normal de ar na sinterização é de aproximadamente 20 m³/kg de combustível (incluindo o ar de resfriamento do sinter)⁽¹⁶⁾.

CONDIÇÕES DE RESFRIAMENTO

O resfriamento do sinter é feito normalmente por ar. Alguns sinters, principalmente os básicos, estão sujeitos à desintegração, quando resfriado por água.

Quando a resistência do sinter é obtida pelo mecanismo de reoxidação, convém que a descarga seja feita somente após a camada inferior do sinter atingir temperaturas da ordem de 400°C⁽²⁾.

5. ÍNDICES DE PRODUÇÃO E DE QUALIDADE DO SÍNTER

Tendo em vista a utilização do aglomerado no alto forno,

pode-se definir como um bom sinter aquêle que apresenta 60% ou mais de teor de ferro, um mínimo de constituintes indesejáveis (enxôfre, fósforo, álcalis, excesso de constituintes formadores de escória, que necessitem de balanceamento etc.) e granulometria: compreendida entre 6 e 25 mm. O sinter deve ser suficientemente resistente para suportar a desintegração durante a estocagem, manuseio e transporte, de tal forma que no ato do carregamento do alto forno se apresente entre 85 e 90% com granulometria superior a 6 mm. Além disso, o sinter deve ser estável dentro do forno. Deve também, apresentar boa redutibilidade⁽³⁶⁾.

Estas qualidades são difíceis de avaliar quantitativamente, apesar da contribuição de diversos autores com sugestões de diferentes tipos de ensaio como o de peneiramento, tamboramento, queda e redutibilidade. Tentativas de padronização de ensaios também foram feitas⁽³⁷⁾.

Os índices normalmente adotados são os de produção unitária, resistência e redutibilidade.

PRODUÇÃO UNITÁRIA

A produção unitária de sinter é definida pela quantidade de sinter, dentro de uma determinada faixa granulométrica, produzida por unidade de área de grelha, por hora. Atualmente adotam-se - frações menores que 25 a 50 mm e maiores que 6 mm^(36, 38, 39).

Adota-se como "tempo de sinterização" para os ensaios em câmaras intermitentes, o período contado a partir da ignição até o fim de operação. O fim de operação é determinado pelo instante em que os gases de exaustão atingem a temperatura máxima.

A produção unitária, que é função da velocidade de sinter

rização, do rendimento de aproveitamento^(§) e, em parte, das características do forno, situa-se, nas sinterizações normais, entre 0,9 a $2 \text{ t/m}^2 \text{ h}^{(6)}$.

Pelo fato da produção unitária estar relacionada com o tempo de duração da operação e com o rendimento de aproveitamento, ela torna-se um dos índices mais importantes na sinterização. Também está indiretamente relacionada com a intensidade de sinterização, pois para obtenção de sinter de elevada intensidade, em geral, necessita-se de maior tempo de sinterização.

Nas unidades experimentais de pequeno porte, devido principalmente, à alta relação entre a superfície e o volume útil da câmara de sinterização, a produção unitária é 10 a 15% inferior à obtida em escala industrial⁽³⁸⁾.

RESISTÊNCIA MECÂNICA

Os ensaios mais comuns são o chamado de "Shatter test" (índice de choque ou impacto) e de tamboramento (índice de abrasão, também conhecido como índice Micum quando ensaiado sob determinadas condições).

O ensaio de resistência mecânica em máquina Deval é ainda pouco difundido, mas tem condições para ser o mais representativo de quantos se conhecem. Este ensaio foi pela primeira vez utilizado em estudos de sinterização pelo Prof. Dr. Tharcísio Damy de Souza Santos^(30,40). O ensaio consiste essencialmente: em carregar os tambores cilíndricos da máquina Deval (descrita no item 2 do capítulo II) com determinada quantidade de sinter compreendido numa faixa granulométrica; na rotação desses tambores com certa ve

(§) conforme definição, dada mais adiante, no item 3 do capítulo II

locidade durante um certo tempo; e na determinação da proporção de finos produzidos.

Neste trabalho os ensaios de resistência mecânica foram realizados na máquina Deval e foram adotadas as mesmas condições - propostas por SOUZA SANTOS⁽³⁰⁾ com exceção da quantidade e da granulometria da carga; essas condições estão especificadas logo adiante. Em virtude da densidade média do sinter a ser ensaiado adotou-se a carga de 2500g por tambor com a seguinte distribuição: 25% entre 12,7 e 19,0 mm; 25% entre 19,0 e 25,4mm e 50% entre 25,4 e 38,4 mm. Essa escolha foi baseada na especificação ASTM D289-63⁽⁴¹⁾.

Manteve-se a mesma expressão proposta pelo autor acima citado^(30,40) para definir a intensidade de sinterização, qual seja:

$$I = 100 - 2 (p - 5)$$

onde p é a porcentagem de finos produzidos na peneira com abertura de 6 mm após o ensaio realizado na máquina Deval, nas seguintes condições:

carga por tambor, g.....	2.500
25% entre 12,7 e 19 mm	
25% entre 19 e 25,4 mm	
50% entre 25,4 e 38,2 mm	
velocidade de rotação, rpm.....	33
duração de ensaio, min	30
abertura da peneira para determinação da porcentagem de finos, mm	6

REDUTIBILIDADE

Inúmeros são os trabalhos publicados, conforme citado na referência (42), propondo diferentes ensaios e, em correspondên

cia, índices de redutibilidade definidos de diferentes maneiras. Ês ses ensaios são feitos normalmente fazendo-se passar uma mistura gasosa constituída de CO e CO₂ ou H₂ e H₂O através de uma determinada massa de sinter fixando-se o tempo de exposição, a temperatura do forno e a composição, a velocidade e a vazão do gás.

Como já foi dito, são índices que nem sempre caracterizam a qualidade do sinter nas condições do alto forno.

Uma maneira indireta de determinar a redutibilidade do sinter é pela determinação do teor de "FeO" no mesmo^(43,44). A redutibilidade diminui com aumento de "FeO" no sinter.

6. ELIMINAÇÃO DE ENXÔFRE DURANTE A SINTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO

Na sinterização de minérios de ferro o enxôfre provém de sulfetos e sulfatos do minérios e do combustível. No combustível só lido o enxôfre pode estar, também, na forma de composto orgânico. Os minérios brasileiros praticamente, não contém enxôfre, sendo o combustível responsável pela maior parcela do mesmo. Êste enxôfre, no carvão nacional, apresenta-se principalmente na forma de sulfeto de ferro (pirita), motivo por que analisar-se-á apenas o aspecto da eliminação de enxôfre a partir do mesmo.

Representa-se, normalmente, a oxidação da pirita durante a ustulação pela reação global, partindo-se de pirita mais oxigênio e dando óxidos de ferro mais dióxidos de enxôfre. Essa reação global é resultante das reações intermediárias como as de decomposição da pirita em monossulfeto de ferro mais enxôfre (acima de 400 a 600°C) e as de oxidação dos compostos formados. Quando há aumento da pressão parcial de CO nos gases e em temperaturas baixas pode-se, também formar S₂ e COS⁽⁵³⁾.

Segundo GIEDROYC⁽⁴⁵⁾, as principais variáveis que afetam a eliminação de enxôfre durante a sinterização de minérios de ferro são: teor de combustível sólido, vazão de ar, teor de cal e teor de ganga. Quando o enxôfre provém da pirita do minério é, também, importante a presença de água de cristalização do minério.

Na sinterização oxidante (não semi-redutora) a reação de oxidação da pirita, pelo menos a do combustível, deve ser completa, pois a temperatura é suficientemente elevada (maior que 600°C) para provocar a decomposição da pirita e a atmosfera é predominantemente oxidante. Na ausência de constituintes formadores de sulfatos, principalmente óxido de cálcio, o SO₂ desenvolvido na combustão é arrastado juntamente com gases de exaustão.

Segundo os resultados citados na referência (45) a presença de apenas 5% de cal na mistura a sinterizar é suficiente para reter praticamente todo SO₂ proveniente de oxidação da pirita, na forma de sulfato de cálcio. Esta reação processa-se na zona de alta temperatura e nas camadas inferiores⁽⁵⁾. Portanto, na presença de cal, um possível mecanismo da eliminação de enxôfre durante sinterização dá-se pelas seguintes etapas: a oxidação da pirita inicia-se a partir de 400°C, aumenta-se rapidamente com o aumento de temperatura e completa-se, praticamente, a 1000°C. O tempo de reação depende muito do tamanho das partículas. A rápida eliminação da água auxilia essa reação. Uma parte do SO₂ é eliminada pelos gases e a outra forma sulfato de cálcio. A decomposição do sulfato de cálcio torna-se importante a partir de 1000°C, sendo facilitada pela baixa atividade de oxigênio próximo às partículas do carvão incandescente e pela presença de argila, sílica e óxido de ferro. Estes óxidos têm a tendência de formar compostos intermediários com o óxido de cálcio, cujos potenciais termodinâmicos de formação são maiores que o de formação do sulfato de cálcio. Quanto maior o es-

tado de escorificação melhor é a eliminação do enxôfre, possível -
mente devido a contatos mais íntimos entre os sulfato de cálcio
e os óxidos formadores de silicatos, ferritas e aluminatos de cálcio⁽⁴⁵⁾; uma escorificação muito intensa, porém, pode causar a re-
tenção de enxôfre pelo fato dêste ficar envolvido pela escória. Ex-
periências realizadas com magnésia na carga demonstraram que a
magnésia retém menos enxôfre do que o óxido de cálcio⁽⁴⁵⁾, o que
leva a crer que adição de dolomita, em vez de calcáreo, pode ser
melhor sob êste aspecto de eliminação de enxôfre.

BYKOV⁽⁴⁶⁾ verificou que aumentando-se a vazão específica
de ar aumentava a velocidade de sinterização, porém diminuía a
eliminação de enxôfre. Isto, provavelmente, por que se torna mais
estreita a zona de reação oxidante da sinterização e reduz a oxida-
ção da pirita do minério. Êste aspecto não deverá ser importante pa-
ra os minérios com baixo teor de enxôfre, isto é, a vazão de ar não
é uma variável importante na eliminação de enxôfre, que não está
presente no minério, mas sim no combustível.

O teor de combustível sólido afeta principalmente o
teor de enxôfre introduzido na carga, e a maior ou menor intensida-
de escorificação devido à maior ou menor temperatura atingida no pro-
cesso. O teor ótimo seria aquêle que apresentasse nível térmico su-
ficiente para provocar a decomposição de sulfato de cálcio e que
permitisse escorificação suficiente, porém não muito intensa a fim
de não envolver compostos contendo enxôfre.

Baseando-se no mecanismo apresentado, as melhores condi-
ções de eliminação de enxôfre seriam quando tôda cal se combinasse
com a sílica e outros óxidos. Na prática atual, para obtenção de
sínter auto ou super-fundente, haveria maior retenção de enxôfre,
segundo a teoria, embora esta desvantagem seja, em parte, compensa-

da pela redução do teor de combustível na carga (desde que o enxôfre é introduzido pelo combustível). O inconveniente nesta prática quando a retenção do enxôfre no sínter final proviria da escorificação rápida e intensa, é a presença de óxido de cálcio com alta atividade.

CAPÍTULO II

MATERIAIS, APARELHAGEM E MÉTODOS

1 - MATERIAIS UTILIZADOS

MINÉRIO DE FERRO

O minério fino de ferro empregado era constituído de mistura de hematita de vários fornecedores da Companhia Siderúrgica Paulista, todos do Vale do Paraopeba. Foi classificado em três frações: 1) menores que 10 mm (designadas por M); 2) em frações menores que 6 mm (M1) e 3) menores que 0,21 mm (70 "mesh") e designadas por M2.

CARVÃO METALÚRGICO

O carvão bruto, de Santa Catarina, que é obtido por separação manual das impurezas mais grosseiras, constitui o que se denomina "carvão lavador". Os teores médios de enxôfre e cinza são bastante elevados, da ordem de 8,0 e 34% respectivamente. Por meio de processos hidromecânicos (britamento e lavagem) este carvão é separado em três porções: carvão metalúrgico (45 a 47%), carvão vapor (28 a 30%) e rejeito piritoso (20 a 23%). O carvão metalúrgico constitui a parte nobre e contém aproximadamente 17% de cinza e, 1,5% de enxôfre; seu poder calorífico superior é especificado em 6.800 kcal/kg e sua granulometria é inferior a 8 mm. O carvão vapor contém aproximadamente 27% de cinza e 3% de enxôfre. O rejeito piritoso contém até 25% de enxôfre na forma de pirita e elevado teor de cinza.

O carvão metalúrgico acima descrito, após a moagem, em laboratório foi classificado, neste trabalho, pelo autor, com as designações CM (fração menores que 3 mm), CM1 (fração compreendida entre 0,84 mm e 2,20 mm) e CM2 (menores que 0,21 mm).

MOINHA DE CARVÃO VEGETAL

O carvão vegetal após a moagem foi classificado em fração menor que 3 mm e em frações compreendidas entre 0,84 e 2,20 mm e designadas por CV e CV1, respectivamente.

MOINHA DE COQUE

O coque utilizado, resultante da coqueificação de mistura de 40% de carvão nacional e de 60% de carvão importado e proveniente da Companhia Siderúrgica Nacional, foi classificado também em frações menores que 3 mm (designada por C) e na faixa granulométrica compreendida entre 0,84 e 2,20 mm (designado por C1).

As tabelas I, II e III reproduzem os resultados de análise química conforme os certificados nºs 309.444, 309.687, 310.708 e 310.764 fornecidos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Na Tabela IV estão representados os resultados das análises granulométricas dos materiais utilizados.

Tabela I - Análise química e poder calorífico superior (P.C.S.) dos combustíveis.

constituente	coque %	carvão metalúrgico %	carvão vegetal %
C _{fixo}	80,9	52,6	67,5
mat. voláteis	1,04	28,4	24,6
cinza	17,1	17,6	7,42
S	0,93	1,43	-
P	-	-	-
P.C.S. (kcal/kg)	6.420	6.871	6.504

Tabela II - Análise das cinzas dos combustíveis.

constituente	coque %	carvão metalúrgico %	carvão vegetal %
SiO ₂	50,9	54,0	24,7
Al ₂ O ₃	27,1	31,8	14,0
Fe ₂ O ₃	13,6	8,72	11,6
CaO	3,27	1,18	19,8
MgO	1,95	0,61	5,61
Na ₂ O	-	-	1,33
K ₂ O	-	-	7,07

Tabela III - Análise química do minério de ferro

Fe _{total} %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	P %	S %
62,5	2,30	4,08	traço	0,10	0,08	0,02

Tabela IV - Análise granulométrica (% retida em cada peneira)

peneira USSS "mesh"	abertura mm	minério de ferro			carvão metalúrgico			carvão vegetal		coque		finos de retorno
		M	MM	MM2	CM	CM1	CM2	CV	CVI	C	CI	
6	10,0											
	6	30,0	16,7		0,5			3,3		1,7		27,3
12	1,68	16,6	19,5		30,2			88,6		22,2		31,5
	0,84	11,2	13,3		30,4	100,0		6,4	100,0	17,8	100,0	15,7
30	0,59	3,7	4,5		11,2			0,6		6,9		4,8
	0,42	3,8	4,6		10,5			0,3		8,9		4,5
-40								0,8				
50	0,297	4,2	5,1		6,8					9,3		3,4
	0,21	2,0	2,4		3,7					7,6		2,1
100	0,149	3,7	4,4	13,0	2,7					7,7		1,9
	0,105	2,3	2,7	8,0	1,4			40,2		4,8		1,4
200	0,074	3,5	4,1	12,1	1,1			20,9		4,4		1,5
	0,053	5,1	6,1	18,0	0,7			16,4		2,5		1,3
-270					0,8			12,0				
325	0,044	1,5	1,8	5,3						1,4		0,5
		12,4	14,8	43,6						4,8		4,1
-325												

2. APARELHAGEM

APARÊLHO DE SINTERIZAÇÃO

O autor, com auxílio do orientador e do Prof. Dr. Tharcísio Damy de Souza Santos, projetou o aparelho para sinterização cujo croquis está na Fig. 2 e cuja vista pode ser apreciada na Fig.3. Consta essencialmente de duas partes: uma câmara tronco-cônica e um conjunto motor-exaustor ligado por canalização de 100 mm de diâmetro à caixa de vento. O aparelho foi projetado para poder operar com câmaras de diversas dimensões.

As câmaras são tronco-cônicas com pequena conicidade, para permitir fácil descarga, apresentando diâmetro maior na parte inferior e com altura útil de 400 mm. A refrigeração é feita por água e a câmara dispõe de três tomadas de temperaturas, uma na interface carga-camada suporte, outra a 140 mm e uma terceira a 280 mm acima da camada suporte, o que permite levantamento das curvas térmicas. A grelha, com furos tronco cônicos de 5 mm de diâmetro menor e 7 mm de diâmetro maior, apoia-se sobre 3 assentos facilmente destacáveis. Construíram-se duas câmaras com as características acima citadas. A maior, com os diâmetros superior de 195 mm e inferior de 225 mm, apresenta uma área de secção transversal média de 437 cm² e a menor, com os diâmetros superior de 135 mm e inferior de 155 mm, apresenta área média de secção transversal de 166 cm². Ambas foram construídas com chapas de aço doce de 3 mm de espessura calandradas cilíndricamente e soldadas. As superfícies médias das secções transversais foram tomadas como área da superfície da grelha. Preferiu-se utilizar a câmara de capacidade menor (área da grelha de 166 cm²) pelo fato de produzir quantidades suficientes de sinter para os ensaios de qualidade e análise química, de apresen-

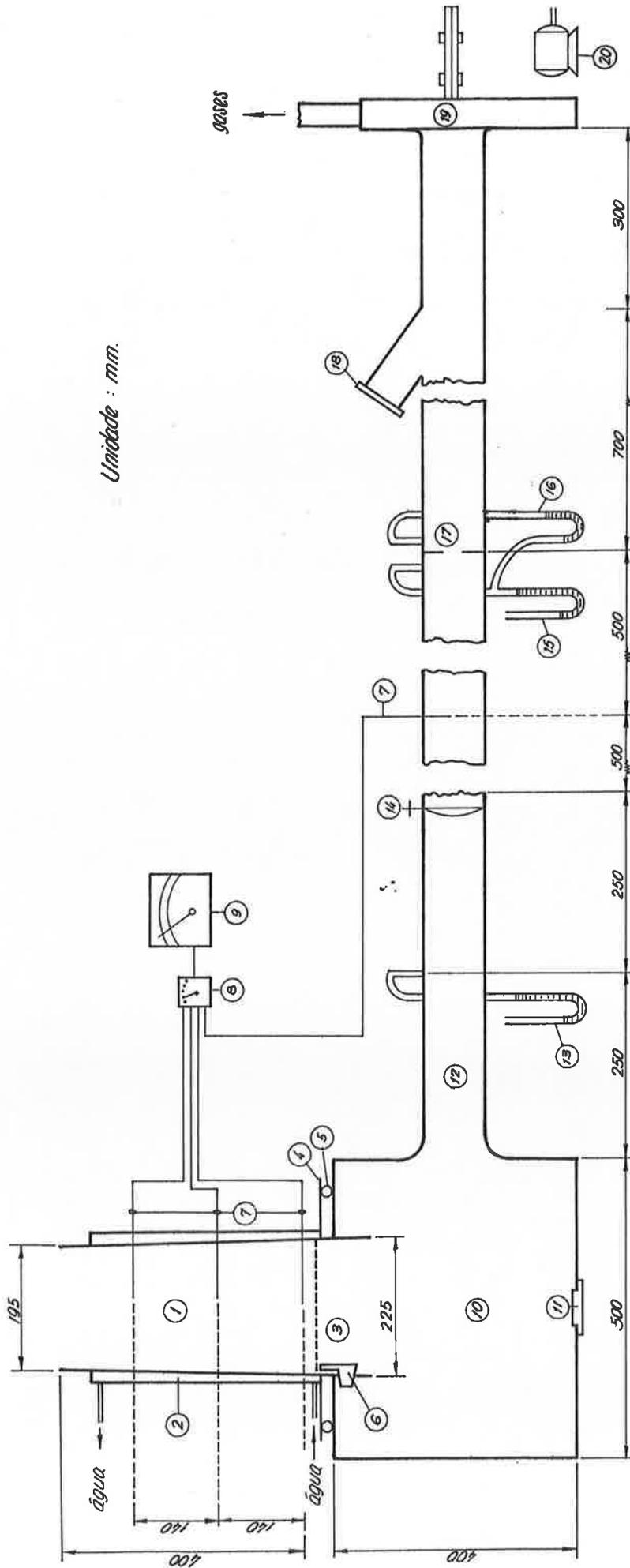


Fig. 2 - Esquema do aparelho de sinterização
1 - câmara; 2 - camisa d'água; 3 - grelha de furos tronco cônico; 4 - abas de apóio; 5 - vedação de mangueira de borracha; 6 - assento de grelha; 7 - pares termo-elétricos de cromel-alumel; 8 - co mutador manual; 9 - pirômetro; 10 - caixa de vento; 11 - abertura para limpeza; 12 - tubo de 100 mm de diâmetro interno; 13 - depressão estática; 14 - válvula tipo borboleta; 15 - depressão estática antes do estrangulamento; 16 - pressão estática diferencial; 17 - anel circular com 50 mm de diâmetro do orifício; 18 - válvula tipo gaveta; 19 - exaustor; 20 - motor de 10 CV e 3.500rpm.

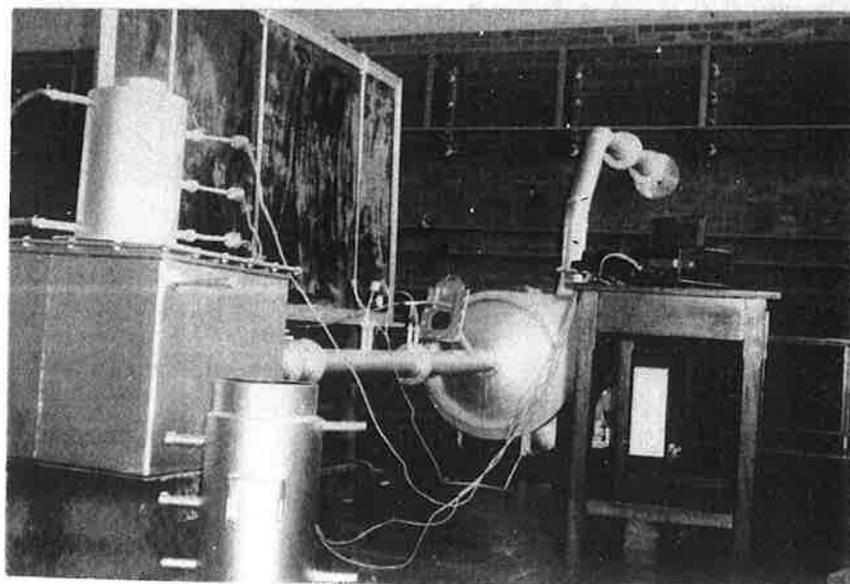
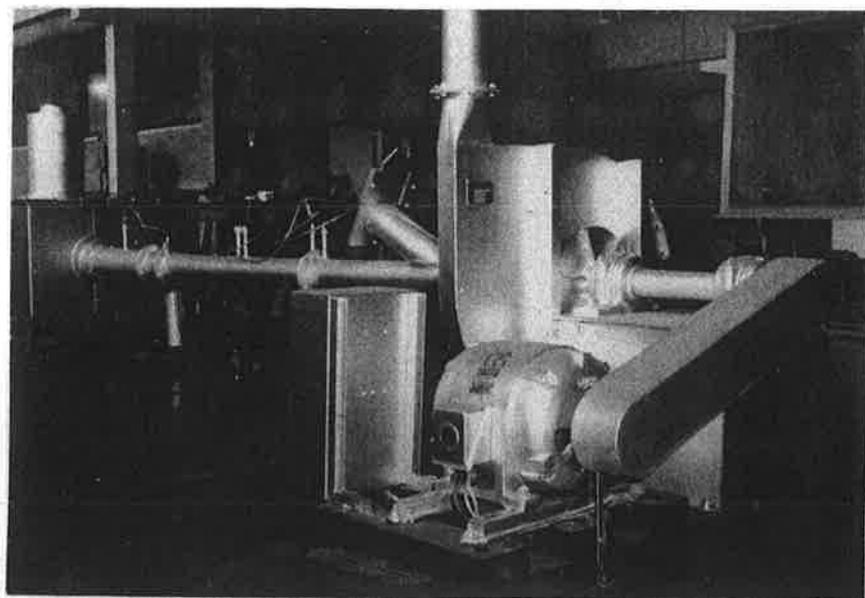


Fig. 3 - Vistas do aparelho de sinterização

tar uma boa reprodutibilidade (conforme os ensaios preliminares) e pelo fato do efeito da superfície de refrigeração não ser pronunciado (segundo a referência⁽⁴⁸⁾). É oportuno salientar que uma análise feita⁽⁴⁸⁾ quanto à capacidade dos aparelhos experimentais de laboratório concluiu que seria suficiente um diâmetro de aproximadamente 80 mm (área da grelha de 50 cm²).

O conjunto para exaustão, incluindo a caixa de vento e canalização, apresenta as seguintes características:

a - ponto para tomada de pressão sob grelha situada na caixa de vento (em coluna de água);

b - válvula borboleta para controle depressão-vazão;

c - medida de vazão pelo sistema de orifício: diâmetro do orifício sendo metade do diâmetro da canalização e com tomadas de pressão diferencial e pressão estática antes do estrangulamento;

e - válvula para entrada de ar frio para controle de vazão e, eventualmente, para refrigeração do exaustor.

O diâmetro da canalização é de aproximadamente 100mm, e comprimento total de 2500 mm. Os pontos para tomada de pressão e temperatura foram feitos soldando-se tubulação de 12,7 mm de diâmetro interno; teve-se o cuidado de que a tubulação assim soldada apresentasse total concordância com superfície interna da tubulação de exaustão para não interferir na medida da vazão. Tomou-se também o devido cuidado de não colocar nenhuma derivação a 5 diâmetros da tubulação antes e após o estrangulamento do orifício. O exaustor está acoplado por meio de correias ao motor com potência de 10 C.V.. A capacidade de depressão é de 1000 mm de coluna de água e a de vazão, nas condições ambientes e em vazio, é de 11m³/min.

A câmara com aba na parte inferior vai apoiada sobre a

caixa de vento, tendo como junta um anel circular de amianto para auxiliar a vedação. Obteve-se uma vedação mais completa colocando-se, em cada experiência, uma massa pastosa de cal. Obteve-se também perfeita vedação com anel circular feito com mangueira de borracha para água.

MISTURADOR CILÍNDRICO, HORIZONTAL

O misturador apresenta diâmetro de 400mm, o comprimento de 400mm e a rotação variável de 40 a 90 rpm. Este aparelho foi utilizado como misturador-pelotizador, fixando-se a rotação em 40 rotações por minuto.

BALANÇAS

Uma balança de prato com capacidade máxima de 10 kg e precisão de 5 g, e outra com capacidade máxima de 1,50 kg e precisão de 1 g.

APARELHO DISTRIBUIDOR DE MISTURA

O aparelho serve para garantir as mesmas condições na determinação do volume específico aparente. Consta de uma caixa prismática retangular contendo 4 palhetas distribuídas no interior e apoiada em 4 pés fixos. Utilizou-se um recipiente cilíndrico com capacidade $1,095 \text{ dm}^3$ para os ensaios.

PENEIRAS

Conjunto de peneiras classificadoras de padrão ASTM, peneiras manuais de abertura de 10, 6, 3 e 2,20 mm e vibrador elétrico de peneiras.

MÁQUINA DEVAL

Consiste basicamente de 2 tambores cilíndricos de ferro fundido com diâmetro interno de 200 mm, profundidade de 340 mm e que giram sobre eixos excêntricos que fazem 30° com eixo horizontal. O tambor apresenta uma das extremidades fechada e a outra com tampa de ajuste perfeito. Um esquema do aparelho acha-se representado na Fig. 1 da referência (49). O aparelho pertence ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas onde está instalado.

MISTURADOR TIPO BETONEIRA

Adaptou-se a este misturador com capacidade de 120 litros um tambor cilíndrico com diâmetro de aproximadamente 400 mm e contendo na parte interna da superfície lateral 3 palhetas com altura de 80 mm distribuídas em intervalos iguais.

OUTROS EQUIPAMENTOS

Utilizou-se também o britador de mandíbulas do Laboratório da Química Tecnológica Geral da Escola Politécnica para obtenção de fração menores que 6 mm e moinho de martelo, instalado no Departamento de Engenharia de Minas, para obtenção de frações finas compreendidas entre 0,841 e 2,20 mm dos combustíveis empregados nas experiências.

3. MÉTODO EMPREGADO

Sequência das operações: - De um modo geral adotou-se a seguinte sequência de operações (casos particulares serão citados a parte):

a) preparação das matérias primas: secagem, britamento, moagem e classificação granulométrica para as condições das experiências.

b) dosagem do material sêco.

c) mistura no misturador cilíndrico, obedecendo às seguintes condições: mistura dos materiais secos durante 5 minutos; adição de água para umidade desejada em duas etapas (para evitar regiões muito úmidas com tendências a pelotizar): inicialmente 50% e o restante após 3 minutos, e mistura durante mais 15 minutos para homogeneização da mistura e consolidação das micropelotas.

d) determinação do volume específico aparente: pelo menos 3 determinações de cada mistura úmida.

e) operação de sinterização:

Colocou-se sôbre a grelha 1 kg de sínter de granulometria maior 6 mm e menor 10 mm para servir de camada suporte, correspondendo aproximadamente a 2 cm de altura. A quantidade foi escolhida de modo que a interface entre a camada suporte e a mistura a sinterizar ficasse situada exatamente na posição do primeiro termo-par.

Sôbre a camada suporte carregou-se a mistura homogeneizada, sempre de maneira idêntica, com o cuidado de compactar levemente junto à superfície e até a altura de 300 mm.

Para auxiliar a ignição colocou-se sôbre a superfície superior da carga 30 g de carvão vegetal (de fração entre 0,841 e 2,20 mm). Ligado o motor, fechou-se gradativamente a válvula de entrada direta de ar no exaustor, inicialmente aberta totalmente.

Após registro da vazão fêz-se a ignição da superfície da carga acendendo-se a camada de carvão por meio de tochas embebidas de querosene. Tomou-se como tempo de ignição 1 minuto e, após

êste instante, fêz-se a contagem de tempo para medida da velocidade de sinterização.

Durante a sinterização anotaram-se as medidas de vazão, pressão e temperatura dos gases de exaustão, além da medida da evolução das temperaturas por meio de três pares termo-elétricos nas posições já citadas (aparelhagem).

Foi adotado como fim da sinterização o instante em que os gases de exaustão atingiram a máxima temperatura. Completava-se a descarga somente após o sinter resfriar-se e atingir praticamente temperatura ambiente. A descarga foi feita retirando-se a grelha, com o cuidado de retirar toda camada suporte, antes de se efetuar a descarga propriamente dita.

f) classificação:

O sinter assim obtido foi fragmentado em porções menores que 50 mm e classificado na peneira de 6 mm de abertura; anotou-se o "rendimento de aproveitamento", definido como a porcentagem em peso de fração maior que 6 mm do material obtido após a descarga. Quando necessário, foram tomadas amostras das partes superior, central e inferior do sinter, para análise química.

g) intensidade de sinterização:

Determinação da intensidade de sinterização na máquina Deval, conforme ensaio já especificado no ítem 5 do capítulo I.

CAPÍTULO III

ENSAIOS PRELIMINARES

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os ensaios preliminares tiveram como objetivo fixar a ordem de grandeza de algumas variáveis de operação, assim como de experimentar câmaras de capacidade diferentes.

O teor de umidade refere-se, neste trabalho, sempre à porcentagem de água adicionada sobre o total da mistura seca.

Os índices de produção unitária e rendimento foram calculados a partir de frações retidas na peneira com abertura de 10mm e não de 6 mm, em virtude de granulometria do minério utilizado.

2. PRIMEIRA SÉRIE DOS ENSAIOS

Nesta série utilizou-se: a câmara cilíndrica de capacidade de maior, com $3,47 \text{ dm}^2$ de área de grelha; minério M (fração menores que 10mm); combustíveis não bitolados (menores que 3 mm) com as designações C, C M e C V para o coque, carvão metalúrgico e carvão vegetal respectivamente; 100 g de moinha de carvão vegetal (CV) para auxiliar a ignição; e 20% de finos de fração menores que passaram na peneira de 6mm após a sinterização. A quantidade da carga por experiência variou de 24 a 27 kg.

Baseando-se nos resultados obtidos na instalação piloto da Campanha Siderúrgica Paulista⁽³⁸⁾ adotaram-se como teores de combustível os níveis 3,5, 4,5, e 5,5% de coque. Os teores de carvão metalúrgico e carvão vegetal foram calculados tomando-se

o critério de equivalência térmica, em correspondência aos níveis adotados de coque.

Adotou-se também o critério de máximo volume específico aparente para determinar o teor de umidade.

Os resultados desta série constam das tabelas V, VI e VII.

Tabela V - Resultados da primeira série dos ensaios preliminares utilizando-se coque (C).

exp.	combustível %	Umidade %	volume específico aparente dm^3/kg	altura da carga cm	permeabilidade de mínima UMP	rendimento %	tempo sinte rização min	produção unitária $\text{kg}/\text{dm}^2 \text{ h}$
1	3,5	4,0	0,440	-	-	-	-	-
	-	4,5	0,447	-	-	-	-	-
	-	5,0	0,450	33,0	21,5	16,5	30	2,2
	-	5,5	0,437	-	-	-	-	-
2	4,5	4,5	0,454	33,5	15,9	56,4	20	11,0
3	5,5	4,5	0,454	33,5	17,3	67,5	19	13,8

Tabela VI - Resultados da primeira série dos ensaios
preliminares utilizando-se carvão meta-
lúrgico (CM).

exp.	combustível %	umidade %	volumen específico aparente dm^3/kg	altura da carga cm	permeabilidade de mínima UMP	rendimento %	tempo de sinte rização min	produção unitária $\text{kg}/\text{dm}^2\text{h}$
4	3,3	4,0	0,450	-	-	-	-	-
	-	4,5	0,457	-	-	-	-	-
	-	5,0	0,486	35,0	19,3	10,4	25	1,7
	-	5,5	0,457	-	-	-	-	-
5	4,2	5,0	0,445	33,5	22,0	51,5	17	5,0
6	5,1	4,0	0,456	-	-	-	-	-
	-	4,5	0,490	35,0	19,8	61,0	20	8,1

Tabela VII - Resultados da primeira série dos ensaios preliminares utilizando-se carvão vegetal (CV).

exp.	combustível %	umidade %	volumen específico aparente dm^3/kg	altura da carga cm	permeabilidade mínima UMP	rendimento %	tempo de síntese min	produção unitária $\text{kg}/\text{dm}^2 \text{ h}$
7	3,5	4,0	0,470	-	-	-	-	-
	-	4,5	0,480	-	-	-	-	-
	-	5,0	0,488	35,0	21,2	6,0	25	0,9
	-	5,5	0,472	-	-	-	-	-
8	4,5	4,0	0,478	-	-	-	-	-
	-	4,5	0,491	35,0	19,8	7,8	17	1,8
9	5,4	4,5	0,504	-	-	-	-	-
	-	4,75	0,510	35,5	10,5	35,7	33	4,3
	-	5,0	0,502	-	-	-	-	-

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA PRIMEIRA SÉRIE

Considerando o alto teor de finos menores que 0,147 mm (100 "mesh") no minério utilizou-se o misturador cilíndrico horizontal para permitir um pequeno grau de pelotização. Verificou-se que se obtinha uma mistura bastante homogênea, com boa reprodutibilidade na determinação do volume específico aparente após tempo mínimo de mistura a contar da adição total de água. Determinou-se que este tempo era da ordem de 15 minutos.

Adotando-se o critério de máximo volume específico aparente, determinou-se que a umidade ótima estaria situada entre 4,5 a 5% sobre a carga seca conforme os resultados apresentados nas tabelas V, VI e VII.

A permeabilidade mínima variou de 10,5 a 22 UMP, situando-se portanto em níveis inferiores ao desejado na prática normal. Os valores baixos podem ser resultantes da presença excessiva de finos menores que 0,147 mm do minério e dos combustíveis (com exceção do carvão vegetal), carga relativamente alta e capacidade insuficiente do exaustor. Em consequência, o tempo de sinterização variou de 17 a 33 minutos e, de uma maneira geral, necessitou-se de mais tempo para permeabilidades baixas de carga, com exceção das experiências 1, 4 e 7. Nessas 3 experiências separou-se a carga seca em duas partes iguais e numa delas fizeram-se adições sucessivas de água entremeadas com as determinações do volume específico aparente. O excesso de água adicionado nas determinações finais fazia com que a carga apresentasse alto grau de pelotização. Observou-se que as pelotas cresceram mais ainda com a adição da outra metade da carga contendo umidade necessária para que a carga total tivesse o teor ótimo. A tendência excessiva de pelotização fez com que, essas experiências, apesar de apresentarem boas

permeabilidades, tivessem tempos longos de sinterização. Já na experiência 9, na primeira metade da carga formaram-se micropelotas, mas o teor de umidade desta porção foi insuficiente para permitir o crescimento das micropelotas com a adição da outra metade da carga; como a primeira metade da carga já estava com pelotas consolidadas, não houve homogeneização da água com a adição da outra metade da carga e, portanto, permitiu que a parte mais seca ficasse encobrindo as pelotas úmidas, o que fez diminuir a permeabilidade.

Verificou-se que a produção unitária mínima de $10 \text{ kg/dm}^2\text{h}$ foi atingida somente com o coque, com teores acima de 4,5%.

Comparando-se os resultados obtidos com os 3 combustíveis, com teores calculados segundo o critério de equivalência térmica, nota-se que este critério não pode ser adotado sem levar-se em conta outros fatores tais como: o teor de matérias voláteis e possivelmente o teor de cinzas do combustível. Observa-se na tabela IV que as granulometrias do coque e do carvão metalúrgico são semelhantes.

3. SEGUNDA SÉRIE DOS ENSAIOS PRELIMINARES

Para contornar a baixa permeabilidade verificada na primeira série resolveu-se operar com altura menor de carga, utilizando a câmara com menor área de grelha ($1,66 \text{ dm}^2$) e combustíveis compreendidos na faixa granulométrica de 0,841 a 2,20 mm (C1 e C11). A utilização dos combustíveis bitolados dentro de uma determinada faixa granulométrica teve também o objetivo de tornar mais significativa a base de comparação entre os resultados.

Utilizou-se o mesmo minério da série anterior (M), 20%

de teor de finos de retôrno e 50 g de carvão vegetal (CVI) para auxiliar a ignição.

Adotaram-se os mesmos níveis para os teores de coque utilizados na primeira série (3,5%, 4,5% e 5,5%), sendo os teores de carvão metalúrgico calculados segundo o critério de equivalência em carbono fixo.

Os resultados dessa série estão apresentados nas tabelas VIII e IX.

Tabela VIII - Resultados da segunda série dos ensaios Preliminares utilizando-se coque (Cl).

exp.	combustível %	umidade %	volume específico aparente dm ³ /kg	altura da carga cm	rendimento %	tempo sinte-riza-ção min	produção unitária kg/dm ² h
10	3,5	4,5	0,462	29,5	29	16	7,0
11	4,5	4,5	0,464	29,5	46,6	15,5	11,2
12	5,5	4,5	0,481	29,5	73,3	16,5	16,0

Tabela IX - Resultados da segunda série dos ensaios preliminares utilizando-se carvão metalúrgico (CMI).

exp.	combustível %	umidade %	volume específico aparente dm^3/kg	altura da carga cm	rendimento %	tempo sinterização min	produção unitária $\text{kg}/\text{dm}^2\text{h}$
13	5,4	5,0	0,458	29,5	43,3	20	7,8
14	7,0	4,0	0,476	29,5	60,7	18	11,7
15	7,0	4,5	0,483	29,5	54,1	17	11,5
16	7,0	5,0	0,441	29,5	66,1	19,5	12,2
17	8,5	4,5	0,496	29,5	58,5	19	10,7

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA SEGUNDA SÉRIE DOS ENSAIOS PRELIMINARES

Nesta segunda série dos ensaios preliminares houve uma melhor constância no tempo de sinterização. Para o coque variou de 15,5 a 16,5 minutos, o que representa uma velocidade média de sinterização de 1,8 cm/minuto contra valores um pouco inferiores obtidos na primeira série (da ordem de 1,7 cm/minuto). Esta melhoria na velocidade de sinterização deve-se provavelmente ao aumento da permeabilidade em função do melhor aproveitamento da capacidade do exaustor, da menor altura da carga e em parte da utilização de combustíveis bitolados. Para o carvão metalúrgico o tempo de sinterização variou de 17 a 20 minutos o que corresponde a ve-

locidade de sinterização de 1,4 a 1,7 cm/minuto.

De uma maneira geral o rendimento de aproveitamento aumentou com o teor de combustível. Maior rendimento foi obtido na experiência 12. Nesta experiência atingiu-se altas temperaturas já na parte superior da carga, o que não ocorreu com as demais experiências dessa série. Este fato leva a crer que a ignição pode - constituir-se um fator importante no índice de produção unitária.

A comparação dos resultados dessa série para o coque e carvão metalúrgico, cujos teores foram calculados segundo critério de equivalência em carbono fixo permite prever que este critério é mais razoável do que o de equivalência térmica.

A utilização da câmara menor parece não ter afetado muito as condições de operação. Conclui-se que a câmara com a área de grelha de $1,66 \text{ dm}^2$ pode ser adotado nos ensaios de laboratório sem que haja grande influência do efeito de superfície lateral da câmara.

4. REPRODUTIBILIDADE DOS ENSAIOS

REPRODUTIBILIDADE DA SINTERIZAÇÃO

A coerência dos resultados obtidos nas duas séries anteriores de ensaios preliminares de sinterização indica já certa reprodutibilidade. Porém para determinar o nível da influência das variáveis não controláveis ou de difícil controle realizou-se uma série de ensaios, com a seguinte mistura: 8,5% de carvão metalúrgico (CM), minério M1, 20% de finos de retôrno e 6% de umidade sôbre a mistura sêca.

Nessa série controlou-se sistematicamente as variáveis mantendo-as constantes na medida do possível.

Os resultados estão apresentados na tabela X.

Tabela X - Reprodutibilidade dos ensaios de sinterização. Ensaios com 8,5% de carvão metalúrgico (CMI) e 6% de umidade

exp.	volume específico aparente dm^3/kg	permeabilidade mínima UMP	tempo de sinterização min	rendimento %	produção unitária $\text{kg}/\text{dm}^2 \text{ h}$	intensidade de sinterização (Deval)
A	0,507	22,1	13,5	67,6	15,7	56,4
B	0,505	23,0	13,0	68,2	16,5	59,2
C	0,510	22,8	13,0	70,0	16,4	65,8
D	0,522	23,5	12,5	67,5	16,5	58,1
E	0,510	23,2	13,0	69,0	15,6	62,8

REPRODUTIBILIDADE DO ENSAIO DE INTENSIDADE DE SINTERIZAÇÃO

SOUZA SANTOS^(30,40) mostrou nas experiências que realizou excelente reprodutibilidade do ensaio, além de evidenciar que este ensaio apresenta boa sensibilidade.

Para confirmar os resultados, principalmente devido às modificações introduzidas realizou-se uma série de ensaios com mesmo tipo de sínter. A dificuldade de obter-se a quantidade suficiente de material para diversos ensaios, numa só sinterização, em escala de laboratório, fez com que o autor utilizasse uma amostra de sínter produzido normalmente na Companhia Siderúrgica Paulista. O sínter ensaiado era superfundente e o mesmo foi retirado no pátio do alto forno, isto é, já havia sofrido todo manuseio inclusive peneiramento para frações maiores que 6 mm. Por essas razões o sínter apresentava-se bastante duro e com arestas arredondadas.

Os resultados dos 5 ensaios realizados e expressos por meio de índice já definido no item 5 do capítulo I estão apresentados na tabela XI.

Tabela XI - Reprodutibilidade dos ensaios de intensidade de sinterização.

ensaio	F	G	H	I	J
intensidade sinterização (Deval)	97,2	97,2	97,4	97,9	97,8

CAPÍTULO IV

EXPERIÊNCIAS SISTEMÁTICAS

1. CONDIÇÕES ADOTADAS NAS EXPERIÊNCIAS SISTEMÁTICAS

Em face dos resultados dos ensaios preliminares, utilizou-se para tôdas experiências dessas séries, a câmara de 1,66dm² de área de grelha, minério de ferro M1 (de fração granulométrica menores que 6 mm), combustíveis bitolados na faixa 0,841 a 2,20mm (C1, C11 e CV1), 30 g de carvão vegetal CV1 para auxiliar a ignição e 30cm de altura da carga a sinterizar.

Fixou-se a porcentagem de finos de retôrno (menor que 6 mm) em 25% da carga sêca, tendo em vista que para as condições das experiências realizadas era impraticável a manutenção do equilíbrio entre finos produzidos e finos de retôrno na carga.

Pelo fato de o minério apresentar alto teor de finos menores que 0,150 mm (quase 30%), o autor preferiu utilizar o misturador cilíndrico horizontal para permitir a micropelotização acentuada, sem o que tornaria difícil a sinterização.

Para as condições adotadas, a quantidade da carga média por experiência, variou de 10,0 a 12,5 kg.

Adotou-se como produto, todo aglomerado retido na peneira com abertura da malha de 6 mm, após a fragmentação do sinter em frações menores que 50 mm.

2. ESTIMATIVA DA UMIDADE ÓTIMA

Considerando-se que a ênfase maior será dada às experiên

cias com carvão metalúrgico, resolveu-se adotar nessa série este combustível e com teor médio dos que vão ser utilizados nas experiências, isto é, 7,3% na carga seca.

O critério adotado para estimar o teor ótimo de umidade foi o de obter o máximo volume específico aparente da mistura úmida.

Na determinação do volume específico aparente utilizou-se o aparelho distribuidor da mistura para se ter sempre as mesmas condições de enchimento do recipiente cilíndrico. Após cada determinação o material foi colocado novamente no misturador, onde se fez adição sucessiva de água. Para cada teor de umidade fizeram-se 3 determinações de volume específico aparente.

Verificou-se numa primeira determinação que adição sucessiva de 0,5% de umidade por muitas vezes introduzia um acúmulo de erro. Para contornar parcialmente este erro fizeram-se as determinações a partir de 3 misturas secas. A primeira com adição inicial de 2% de umidade seguindo-se adições sucessivas de 1,5% da mesma. De forma idêntica a segunda iniciando-se com 2,5% e a terceira com 3,0% e adições sucessivas de 1,5%.

O comportamento anômalo verificado na primeira determinação foi confirmado repetindo-se os ensaios.

Na tabela XII estão os resultados médios do volume específico aparente. A figura 4 indica melhor o aspecto do comportamento.

Tabela XII - Variação do volume específico aparente
com o teor de umidade

umidade %	volume específico aparente (médio) dm ³ /kg	umidade %	volume específico aparente (médio) dm ³ /kg
0	0,440	5,0	0,510
1,0	0,450	5,5	0,515
2,0	0,465	6,0	0,524
2,5	0,483	6,5	0,518
3,0	0,490	7,0	0,502
3,5	0,505	7,5	0,517
4,0	0,520	8,0	0,500
4,5	0,502	8,5	0,490

3. EXPERIÊNCIAS REALIZADAS COM COQUE E SEUS RESULTADOS

Baseando-se nos resultados preliminares e utilizando-se o critério de máxima produção unitária adotaram-se as proporções de coque na mistura variando em 3 níveis: 4,0%, 4,75% e 5,5%.

Os resultados dessas experiências estão nas tabelas XIII, XIV e XV.

Tabela XIII - Resultados com 4% de coque (C1).

exp.	umida de %	volume especí- fico a paren- te ³ dm ³ /kg	permea- bilida- de mí- nima U.M.P.	tempo sinte- riza- ção min	rendi- mento %	produção unitária kg/dm ² h	intensida- de sinte- riza- ção (Deval)
1111A	4,0	0,470	19	-	-	-	-
1111B	4,5	0,472	19,5	44	48,5	4,0	26,0
1111C	5,0	0,465	22,8	25	63,8	9,0	26,6
1111	5,5	0,474	24,8	12,5	67,1	19,0	26,6
1112	6,0	0,498	24,0	13,5	58,8	16,6	22,6
1113	6,5	0,476	26,2	9,5	42,2	15,5	13,8

Tabela XIV - Resultados com 4,75% de coque (Cl)

exp.	umidade %	volume especí- fico a paren- te ₃ dm ³ /kg	permea- bilida- de mí- nima U.M.P.	tempo sinte- riza- ção min	rendi- mento %	produção unitária kg/dm ² h	intensi- dade sin- teriza- ção (Deval)
1121	5,5	0,478	23,1	13,0	68,0	19,7	48,6
1122	6,0	0,498	27,6	10,0	65,0	22,0	46,0
1123	6,5	0,480	28,1	9,0	65,5	24,0	42,4

Tabela XV - Resultados com 5,5% de coque (Cl).

exp.	umidade %	volume especí- fico a paren- te ₃ dm ³ /kg	permea- bilida- de mí- nima U.M.P.	tempo sinte- riza- ção min	rendi- mento %	produção unitária kg/dm ² h	intensi- dade de sinteri- zação (Deval)
1131	5,5	0,492	26,6	11,5	77,5	22,8	62,2
1132	6,0	0,496	23,5	11,0	71,0	21,5	59,4
1133	6,5	0,486	24,0	12,5	63,0	19,1	58,0

4. EXPERIÊNCIAS COM CARVÃO METALÚRGICO E SEUS RESULTADOS

Nas primeiras séries adotaram-se os teores de carvão metalúrgico de 6,2%, 7,3% e 8,5% na mistura. Esses teores foram calculados adotando-se o critério de equivalência em carbono fixo com as proporções de coque (4,0%, 4,75% e 5,5%) já utilizadas. Não sendo possível determinar a máxima produção unitária com essas 3 séries ensaiaram-se mais 2 séries contendo 8,0% e 9,0% de carvão metalúrgico na mistura a sinterizar.

Uma vez determinada a produção unitária máxima, para as condições adotadas, variou-se numa outra série o tipo de misturador. Nesta série a mistura foi feita no tambor cilíndrico (já descrito no ítem 2 do capítulo II) adaptado num misturador betoneira e fez-se adição de água por meio de um borrifador.

Experimentou-se também a variação da maneira de mistura. Para tal foi utilizado o mesmo misturador da série anterior (betoneira), onde se fez inicialmente a mistura dos finos de retôrno e finos de minério, seguindo-se a adição de água e só então o carvão foi adicionado no misturador em movimento.

Os resultados das experiências com carvão metalúrgico estão nas tabelas XVI a XXII.

Tabela XVI - Resultados com 6,2% de carvão metalúrgico (CMI).

exp.	umidade %	volume especí- fico a paren- te ³ dm ³ /kg	permea- bilida- de mí- nima U, M, P.	tempo sinte- riza- ção min	rendi- mento %	produção unitária kg/dm ² h	intensi- dade de sinteri- zação (Deval)
1211	5,5	0,510	20,6	14	56,7	13,6	23,4
1212	6,0	0,493	23,0	12,5	58,1	15,8	32,8
1213	6,5	0,485	23,1	12,5	49,0	13,3	19,6

Tabela XVII - Resultados com 7,3% de carvão meta-
lúrgico (CMI).

exp.	umidade %	volume especí- fico a paren- te ₃ dm ³ /kg	permea- bilida- de mí- nima U.M.P.	tempo sinte- riza- ção min	rendi- mento %	produção unitária kg/dm ² h	intensi- dade de sinteri- zação (Deval)
1221	5,5	0,505	23,0	13,0	64,4	15,9	52,0
1222	6,0	0,512	24,4	12,0	58,3	15,5	42,0
1223	6,5	0,474	23,2	12,5	60,2	15,8	49,2

Tabela XVIII - Resultados com 8,5% de carvão meta-
lúrgico (CMI).

exp.	umidade %	volume especí- fico a paren- te ₃ dm ³ /kg	permea- bilida- de U.M.P.	tempo sinte- riza- ção min	rendi- mento %	produção unitária kg/dm ² h	intensi- dade de sinteri- zação (Deval)
1231	5,5	0,529	27,0	12,0	68,7	17,9	64,0
1232	6,0	0,522	25,2	11,0	71,6	20,5	54,8
1233	6,5	0,495	23,8	13,5	76,8	20,2	70,2

Tabela XIX - Resultados com 8,0% de carvão metalúrgico (CMI).

exp.	umidade %	volume específico aparente dm^3/kg	permeabilidade de mínima U.M.P.	tempo sinterização min	rendimento %	produção unitária $\text{kg}/\text{dm}^2\text{h}$	intensidade de sinterização (Deval)
1241	5,5	0,541	22,4	27,0	60,1	6,9	42,6
1242	6,0	0,527	24,2	12,0	65,0	16,3	49,6
1243	6,5	0,523	22,5	15,5	71,0	15,8	58,4

Tabela XX - Resultados com 9,0% de carvão metalúrgico (CMI).

exp.	umidade %	volume específico aparente dm^3/kg	permeabilidade de mínima U.M.P.	tempo sinterização min	rendimento %	produção unitária $\text{kg}/\text{dm}^2\text{h}$	intensidade de sinterização (Deval)
1251	5,5	0,520	23,2	12,5	71,1	17,5	62,4
1252	6,0	0,522	22,5	11,5	69,0	18,9	52,4
1253	6,5	0,505	26,8	13,0	69,0	15,8	63,6

Tabela XXI - Resultados com 8,5% de carvão metalúrgico (CMI) utilizando-se betoneira como misturador.

exp.	umidade %	volume específico aparente dm^3/kg	permeabilidade de mínima U.M.P.	tempo sinterização min	rendimento %	produção unitária $\text{kg}/\text{dm}^2\text{h}$	Intensidade de sinterização (Deval)
2231	5,5	0,550	18,6	14,5	63,6	12,9	58,6
2232	6,0	0,552	24,4	12,5	64,6	15,4	52,8
2233	6,5	0,540	22,6	12,5	57,5	13,9	50,0

Tabela XXII - Resultados obtidos utilizando-se betoneira como misturador e com adição de carvão metalúrgico (CMI) somente na etapa final da mistura.

exp.	umidade %	volume específico aparente dm^3/kg	permeabilidade de mínima U.M.P.	tempo sinterização min	rendimento %	produção unitária $\text{kg}/\text{dm}^2\text{h}$	Intensidade de sinterização (Deval)
4231	5,5	0,538	25,0	13,0	63,8	14,8	45,2
4232	6,0	0,520	23,8	11,5	57,7	14,5	58,8
4233	6,5	0,520	25,0	12,5	57,3	14,2	46,6

5. EXPERIÊNCIAS COM CARVÃO VEGETAL E SEUS RESULTADOS

Realizaram-se 3 série de experiências com carvão vegetal com 4,8%, 5,7% e 6,6%. Êsses teores foram adotados baseando se na equivalência em carbono fixo com os 4,0%, 4,75% e 5,5% de coque, tomados como base de referência.

Os resultados de sinterização com carvão vegetal estão nas tabelas XXIII, XXIV e XXV.

Tabela XXIII - Resultados com 4,8% de carvão vegetal
(CV1).

exp.	umidade %	volume específico aparente dm ³ /kg	permeabilidade de mínima U.M.P.	tempo sinterização min	rendimento %	produção unitária kg/dm ² h	intensidade de sinterização (Deval)
1311	5,5	0,540	16,4	24,0	6,3	0,8	-
1312	6,0	0,522	19,9	14,0	8,5	1,8	-
1313	6,5	0,522	21,8	11,0	9,3	2,6	-

Tabela XXIV - Resultados com 5,7% de carvão vegetal (CV1).

exp.	umidade %	volume especí- fico a paren- te dm ³ /kg	permea- bilida- de mí- nima U.M.P.	tempo sinte- riza- ção min	rendi- mento %	produção unitária kg/dm ² h	Intensi- dade de sinteri- zação (Deval)
1321	5,5	0,527	22,2	14,5	23,8	5,0	-
1322	6,0	0,528	22,3	14,0	16,8	3,6	-
1323	6,5	0,550	25,4	12,0	15,2	3,9	-

Tabela XXV - Resultados com 6,6% de carvão vegetal (CV1).

exp.	umidade %	volume especí- fico dm ³ /kg	permea- bilida- de U.M.P.	tempo sinte- riza- ção min	rendi- mento %	produção unitária kg/dm ² h	intensi- dade de sinteri- zação (Deval)
1331	5,5	0,570	17,3	15,5	20,0	3,6	-
1332	6,0	0,567	22,4	12,0	26,4	6,3	-
1333	6,5	0,580	22,4	11,0	21,3	5,6	-

6. ALGUMAS EXPERIÊNCIAS PARA OBTENÇÃO DE SÍNER SEMI-REDUZIDO

Prosseguindo os estudos realizados por BROSCHE⁽²⁾, realizou-se uma série de experiências para obtenção de síner semi-reduzido, com carvão metalúrgico.

Utilizou-se minério (M2) de frações granulométricas menores que 0,21 mm (70"mesh") e o carvão metalúrgico (CM2) também de frações granulométricas menores que 0,21 mm (70 "mesh"). Procedeu-se à seguinte sequência: mistura a seco no misturador cilíndrico horizontal por 5 minutos seguidos de pré-pelotização no misturador tipo betoneira sem palhêtas, com adição de 10% de umidade e classificação das pelotas para dimensões médias de 3 a 6 mm de diâmetro; carga das micropelotas a verde seguido de sinterização.

Nessas experiências variou-se apenas o teor de combustível e na medida do possível foram mantidas constantes as demais variáveis.

Os resultados das análises químicas dos síneters semi-reduzidos estão apresentados na tabela XXVI.

Tabela XXVI - Resultados das análises químicas dos síneters semi-reduzidos. (§)

exp.	combustível %	ferro me- tálico %	óxido fer- roso %	ferro to- tal %	enxôfre %
5244	13	2,2	44,3	71,2	0,11
5254	16,5	9,6	58,9	62,2	0,29
6264	20	11,5	67,2	65,5	0,36

(§) certificado nº 317.450 (IPT).

CAPÍTULO V

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

1. REPRODUTIBILIDADE DOS ENSAIOS

Os resultados da tabela X mostram que, mesmo com rigoroso controle das variáveis, os ensaios apresentam pequenas flutuações de resultados. Isto, é resultante dos efeitos das variáveis não controláveis e também devido à imprecisão de até 5% na determinação do tempo de sinterização. Esta imprecisão do tempo de sinterização influencia com a mesma ordem de grandeza as determinações da produção unitária. Nota-se entretanto que as amplitudes dos desvios nos índices de qualidade e de produção não ultrapassam os 8%. Para os ensaios dessa natureza pode-se considerar que o nível de reprodutibilidade é bom. As curvas térmicas apresentadas nas figuras 8, 9, 10, 11 e 12 mostram a excelente semelhança nos comportamentos, portanto, o levantamento e a análise dessas curvas poderão confirmar ou elucidar melhor alguns mecanismos da sinterização, principalmente os fenômenos de combustão e transmissão de calor.

Confirmando os resultados de SOUZA SANTOS^(30,40) a tabela XI mostra a excelente reprodutibilidade dos ensaios de intensidade de sinterização feitos na máquina Deval.

2. VARIAÇÃO DO VOLUME ESPECÍFICO APARENTE COM A UMIDADE

Para os materiais empregados constatou-se um comportamento anômalo na variação do volume específico aparente com o teor

de umidade (Tab. XII e Fig. 4). Julga-se que êste comportamento de ve-se principalmente ao fato de se ter utilizado minério de granulometria não usual na sinterização, isto é, com teores excessivos de partículas finas e também materiais de natureza de absorção físico-química heterogênea.

Verifica-se na Fig. 4 que o volume específico aparente aumentou continuamente com a umidade até atingir o primeiro máximo aos 4%, sofrendo nova inflexão e atingindo o máximo absoluto na faixa dos 6% de umidade. Adição maior de umidade fêz abaixar o volume específico aparente até aproximadamente 7% e com 7,5% atingir um outro máximo e daí abaixar até os níveis próximo dos 8,5%. Foi impossível determinar o volume específico aparente para teores maiores de umidade pois a mistura tornou-se bastante pastosa e impediu a queda do material pelo aparêlho distribuidor.

Acompanhando o aspecto da mistura, após cada adição de água, pôde-se verificar os seguintes fenômenos: atingiu-se o primeiro máximo quando a mistura apresentava suficientemente úmida para permitir a adesão de tôdas partículas finas nas maiores, sem empastar a mistura ou apresentar a tendência de formar pequenas pelotas (micropelotas); com 4,5 a 5,5% de água a mistura ficou bastante úmida, porém insuficiente para dar condições de pelotização; já com 6% de umidade a mistura apresentou alto grau de pelotização o que, provavelmente, fêz elevar o volume específico aparente. Adição maior de umidade fêz com que a água permanecesse principalmente, nas partes periféricas das pelotas tornando-as pastosas e portanto diminuindo a porosidade. Um novo máximo com teor de 7,5% de umidade deve-se ao fato das pelotas crescerem um pouco e tornarem-se uniformes no tamanho (da ordem de 5 a 6 mm), em função do tempo de permanência no misturador pelotizador. Isto mostra que o

ideal seria, utilizar sempre mistura sêca para determinar o volume específico aparente para cada teor de umidade. Entretanto, comparando-se com os resultados obtidos na tabela XVII, os quais foram obtidos com o mesmo tipo de carga, porém, sempre partindo da mistura sêca para cada determinação, verifica-se que o máximo volume específico está situado, realmente, nas proximidades dos 6% de umidade embora os valores sejam um pouco inferiores aos da tabela XII, principalmente para 6,5% de umidade, como era de se esperar.

Baseando-se nos resultados do volume específico aparente tomou-se como umidade ótima o teor de 6,0%, para todas experiências com carvão metalúrgico e para verificar o efeito das pequenas variações da umidade ensaiou-se com 0,5% acima e abaixo do teor determinado por este método. Pode-se notar nas tabelas XVI a XXII que o máximo volume específico continuou nas proximidades dos 6,0%, mesmo com pequenas alterações no teor de carvão, o que confirma a validade dos resultados para a fixação do teor de umidade para aquele nível.

Na primeira série das experiências com coque variou-se o teor de umidade de 4,0 a 6,5% e verificou-se que para o coque, o máximo volume específico estava situado também nas proximidades dos 6%. Os resultados estão na tabela XIII e nas duas tabelas seguintes, com teores pouco maiores de coque. Praticamente, também não variou a umidade ótima com pequenas variações nos teores de coque.

A coincidência no valor de umidade ótima, tanto para carvão metalúrgico como para o coque, e também o fato dessa umidade não se alterar praticamente com pequenas variações dos combustíveis é, provavelmente, devida à utilização de combustíveis bitolados dentro duma mesma faixa granulométrica (entre 0,84 e 2,2 mm).

Pode-se então dizer que a umidade ótima é função quase que somente do teor de finos menores que 0,150 mm (100 "mesh") da mistura. Para as mesmas características da mistura, aumentando o teor de finos menores que 0,150 mm aumenta-se o teor de umidade correspondente ao máximo volume específico aparente.

Analizando-se os resultados das tabelas XIII e XXV verifica-se que não há praticamente uma correlação exata entre o volume específico aparente e o tempo de sinterização. Nota-se também que não se pode correlacionar o volume específico aparente com a permeabilidade mínima após ignição. Estes aspectos eram previstos pois o volume específico aparente é um índice que mede a permeabilidade antes do carregamento no forno e nada nos diz sobre o comportamento durante a sinterização, especialmente quando se trata de carga micropelotizada como ocorreu nas experiências realizadas. Devido à resistência mecânica baixa de algumas micropelotas elas podem desintegrar-se parcialmente durante o manuseio, inclusive durante o carregamento.

3, COMPARAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS

Tomando-se como base de referência o teor de carbono fixo nas misturas a sinterizar deve-se comparar os resultados da tabela XIII para o coque com os das tabelas XVI e XXIII para o carvão metalúrgico e carvão vegetal respectivamente. Análogamente deve-se comparar os resultados das tabelas XIV, XVII e XXIV e os das tabelas XV, XVIII e XXV.

Verifica-se que os tempos médios de sinterização variam pouco para os diferentes combustíveis. Observa-se que a sequência: coque, carvão metalúrgico e carvão vegetal corresponde a uma tendência de aumentos crescentes de tempo de sinterização.

Os resultados de rendimento de aproveitamento e de intensidade de sinterização são semelhantes para o coque e carvão metalúrgico, para os mesmos teores de carbono fixo, embora o rendimento de aproveitamento para o carvão vegetal seja bem mais baixo, em relação aos outros dois combustíveis. Devido ao baixo rendimento alcançado com carvão vegetal, não se pôde efetuar os ensaios de intensidade de sinterização por não se dispor de quantidade suficiente de material em cada experiência. Observou-se também que os sinters produzidos com carvão vegetal eram muito pouco resistentes ao manuseio. Estes resultados aliados ao comportamento das curvas térmicas (Fig.46) demonstram e confirmam que o mecanismo mais importante nas sinterizações normais de minérios hematíticos é o da escorificação. Isto explica, em parte, a razão de necessitar-se de teores elevados de combustível para se obter sinters resistentes quando se utiliza carvão vegetal. Mostra também a importância maior da cinza do combustível do que propriamente a ganga do minério, para obtenção de sinter não fundente. A ganga do minério apresenta-se, muitas vezes, no interior das partículas do minério, inclusive formando compostos intermediários, o que dificulta a sua participação no processo de escorificação durante a sinterização.

Dentro do critério de fixação de um mesmo teor de carbono fixo para misturas de diferentes combustíveis atingiu-se a maior produção unitária nas sinterizações com o coque. Valores pouco inferiores (da ordem de 20%) foram obtidos com carvão metalúrgico e resultados bem inferiores com o carvão vegetal.

Comparando-se as curvas térmicas para diferentes combustíveis (coque: Fig. 13 a 21; carvão metalúrgico: Fig. 22 a 39; carvão vegetal: Fig. 40 a 45) verifica-se que as experiências reali-

zadas com coque apresentaram desenvolvimento das ondas térmicas de combustão e transmissão praticamente coincidentes, o que vem a confirmar a teoria de BOUCRAUT e ROCHAS⁽⁷⁾ e WSCIEKLICA⁽⁹⁾.

Pode-se notar, para as cargas com carvão vegetal, que as curvas térmicas (Fig. 40 a 45) apresentaram faixas largas evidenciando o avanço mais rápido da onda de combustão do que a de transmissão; isto é explicável por ser o mais reativo dentre os combustíveis utilizados. O carvão metalúrgico, que tem reatividade intermediária, entre o coque e o carvão vegetal, apresentou curvas térmicas de faixas intermediárias (Fig. 22 a 39). Estas curvas térmicas mostram que, também para o carvão metalúrgico, não houve coincidência nas velocidades de propagação das ondas térmicas de combustão e de transmissão, nas experiências realizadas. A Fig. 46 mostra a comparação dos aspectos das curvas térmicas obtidas na sinterização com coque, carvão metalúrgico e carvão vegetal. As experiências com carvão vegetal, apesar que condições diferentes de operação, apresentaram curvas térmicas semelhantes às obtidas por WSCIEKLICA⁽⁹⁾.

As considerações feitas levam à conclusão de que, para um máximo aproveitamento térmico dos combustíveis com reatividades maiores do que do coque, é necessário alterar as variáveis da carga e da operação para que aumente a velocidade de transmissão de calor, isto é, principalmente o aumento da eficiência de troca de calor entre o material quente e o ar. O autor julga que deverá existir permeabilidade ótima e vazão específica ótima que possam conduzir aos resultados desejáveis para aproximação das duas ondas térmicas. O teor de umidade também parece ser bastante importante, ou por influir na permeabilidade ou por retardar o avanço da onda de combustão (Fig. 51 e 52). Estes aspectos de primordial importância

cia devem ser melhor estudados para que possibilitem a utilização racional do carvão metalúrgico.

Os altos níveis térmicos atingidos como o carvão metalúrgico (Fig. 49 e 50) comparados com os obtidos com coque (Fig. 47 e 48) com teores calculados baseando-se na equivalência em poder calorífico superior, mostram que pelo menos boa parte das matérias voláteis dos combustíveis é também queimada. A argumentação é reforçada pelos aspectos das curvas térmicas apresentadas nas experiências com carvão metalúrgico (Fig. 22 a 33) e nas experiências com o coque (Fig. 13 a 21). Verifica-se nas fig. 22 a 33 que a frente térmica varia rapidamente, em questão de 30 segundos ou menos, da temperatura de 200 para mais de 1000°C. Nota-se um aquecimento mais ou menos lento até atingir aproximadamente 200 a 300°C, o que corresponde à zona de secagem. Comportamento semelhante verifica-se com o coque (Fig. 13 a 21).

4. MISTURAS DAS CARGAS FEITAS DE MANEIRAS DIFERENTES

Maneiras diferentes de misturas foram feitas com 8,5% de carvão metalúrgico (CMI) e para 3 níveis de umidade conforme constam das tabelas XVIII, XXI e XXII.

Os resultados da tabela XVIII foram obtidos com misturas feitas normalmente no misturador pelotizador cilíndrico com eixo de rotação horizontal. Na tabela XXI estão os resultados com misturas feitas no tambor cilíndrico contendo 3 palhêtas de aproximadamente 80 mm de altura distribuídas em intervalos iguais na superfície interna do mesmo. Manteve-se a inclinação do eixo de rotação da betoneira a aproximadamente 30° da posição horizontal. Já os resultados da tabela XXII foram obtidos com misturas feitas na

betoneira acima referida, porém com adição de carvão somente na etapa final da mistura, isto é, misturou-se a carga seca sem o combustível seguido de adição contínua e total de água e finalmente espalhou-se cuidadosamente o combustível sobre a carga com o misturador em movimento.

Observou-se que melhores resultados foram obtidos com misturas feitas no tambor cilíndrico horizontal para todos índices, sejam do rendimento de aproveitamento, produção unitária e intensidade de sinterização. Isto mostra que à medida que diminui a intensidade da micropelotização e consolidação das micropelotas, diminuem também os índices citados, principalmente por tornar mais frágeis as micropelotas e portanto diminuindo a permeabilidade média, embora a permeabilidade mínima após ignição sejam comparáveis.

Comparando-se os resultados das tabelas XXI e XXII verifica-se que os índices de qualidade e de produção praticamente são os mesmos embora a permeabilidade mínima após ignição tenha tornado menos sensível às variações de umidade quando se mistura carvão somente na etapa final.

Os baixos índices de qualidade e de produção apresentados na tabela XXII em relação aos da tabela XVIII apesar de apresentarem permeabilidades mínimas após ignição comparáveis, podem ser resultantes da heterogeneidade do carvão na mistura como podem ser observadas nas figuras (37, 38 e 39) que mostram comportamento irregulares das curvas térmicas; também podem ser resultantes do próprio mecanismo de ligação. As partículas do carvão não estando intimamente encobertas pelos finos de minério, as mesmas queimam-se com menos contato entre as cinzas e o óxido de ferro e portanto tornando menos intensa a formação de faiárita.

Os volumes específicos aparentes das misturas feitas na betoneira são sensivelmente maiores do que os das misturas feitas no misturador pelletizador horizontal, mostrando a menor consolidação das micropelotas.

A tabela XIII mostra que praticamente não é possível sinterizar as matérias primas utilizadas sem a técnica de micropelotização, pois as misturas com umidade próxima do correspondente ao primeiro máximo do volume específico aparente, possuem permeabilidades bem baixas.

5. EFEITO DA VARIAÇÃO DE UMIDADE NA CARGA NO INTERVALO DE MAIS E MENOS, 0,5%.

Os resultados tanto com carvão metalúrgico como com coque mostram que as pequenas variações de umidade, ($\pm 0,5\%$) em torno do valor estabelecido, não alteram significativamente os resultados. A conclusão é válida para o caso específico em que se faz a micropelotização e desde que se escolha convenientemente o teor de umidade. A estimativa da umidade ótima pelo critério de máximo volume específico mostrou ser eficiente nas experiências realizadas. Convém salientar que nas condições experimentais a degradação da micropelotas devido ao manuseio e carregamento são pequenas se comparadas com unidades industriais. Nestas condições, um pequeno excesso de umidade deve ser aconselhável para conferir melhor estabilidade às micropelotas.

Verifica-se na tabela XIII que determinação incorreta da umidade ótima pode conduzir a regiões extremamente sensíveis a pequenas variações de umidade. O tempo de sinterização de 44 minutos que foi necessário para a mistura com 4,5 de umidade reduziu bruscamente para 25 minutos com 5,0% e para 12,5 minutos para 5,5%

de umidade. A qualidade do produto, quanto ao índice de intensidade de sinterização praticamente não variou para essas experiências.

A análise de variância aplicada aos resultados obtidos com carvão metalúrgico e coque, para os 3 níveis de teor de umidade (5,5%, 6,0% e 6,5%), supondo-se que o modelo possa ser considerado um modelo fixo e admitindo-se que não há interação entre variação do teor de umidade e variação do teor de combustível, para mesmo combustível, para os níveis adotados, mostrou que não há diferença significativa dos resultados dos índices de produção unitária e de qualidade.

A hipótese de que não há interação entre a variação de teor de umidade e a variação de teores dos combustíveis é viável de acordo com as considerações feitas no item 2 deste capítulo (variações pequenas de umidade).

Conclui-se que para as sinterizações realizadas em que se utilizou a técnica de micropelotização as variações de $\pm 0,5\%$ na umidade não alteraram significativamente os resultados, com a adoção de umidade ótima estimada pelo critério de máximo volume específico aparente. As variações para teor elevado mostraram ser menos prejudiciais à obtenção de boas características do que para teores inferiores de umidade. Esses resultados são decorrentes da estimativa correta da umidade ótima.

O autor julga que este comportamento deverá ser também verificado para tipos diferentes de mistura, principalmente para diferentes granulometrias das matérias primas.

6. TEORES DE ÓXIDO FERROSO E DE ENXÔFRE NOS SÍNTERS

As análises químicas de amostras de alguns sinters apresentaram os teores de óxido ferroso e de enxôfre conforme constam na tabela XXVI (certificados nos 317.019 ; 317.020 e 317.449 do IPT).

Tabela XXVII - Teores de óxido ferroso e de enxôfre nos sinters.

exp.	combustível		umidade %	ferro metá- lico %	óxido ferro- do %	enxôfre %
	tipo	teor %				
1112	coque	4,0	6,0	x	18,8	traços
1122	"	4,75	6,0	x	21,1	traços
1132	"	5,5	6,0	x	22,6	traços
1212	carvão me- talúrgico	6,2	6,0	x	22,5	traços
1222	"	7,3	6,0	X	22,5	traços
1231	"	8,5	5,5	x	22,6	0,023
1232	"	8,5	6,0	x	22,5	0,020
1233	"	8,5	6,5	x	22,5	0,027
1242	"	8,0	6,0	0,39	22,8	0,013
1252	"	9,0	6,0	0,56	23,8	0,013
2232	"	8,5	6,0	0,43	23,5	0,015
4232	"	8,5	6,0	0,68	23,8	0,012

(x) : não foram feitas determinações

Nota-se que os sinteros produzidos apresentaram teores e levados de óxido ferroso, o que a primeira vista pode dar a impressão de que é um sinter de alta resistência mecânica, mas de difícil redutibilidade, porém observe-se que mesmo o sinter obtido com 4,0% de coque na carga apresentou praticamente 19% de óxido ferroso. Este último comportamento comprova que o alto teor de ferroso deve-se principalmente à técnica de micropelotização que foi utilizada, pois sem a utilização dessa técnica o teor do mesmo óxido deveria ser da ordem de 10 a 15%⁽⁴³⁾.

As determinações dos teores de enxofre, nas amostras de alguns sinteros conforme constam da tabela XXVII, mostraram que esses teores são insignificantes na prática siderúrgica para os sinteros obtidos com coque e também para os obtidos com teores de carvão metalúrgico inferiores a 8,5%. Tal como era previsto na análise feita no item 6 do capítulo I verificou-se uma eliminação superior a 85% do enxofre inicialmente contido na carga. Esses resultados mostram, sob o aspecto de eliminação de enxofre, a vantagem de se desviar uma parcela (30 a 40%) do carvão metalúrgico nacional para a sinterização o que permitirá abaixar para aproximadamente 25% o teor desse carvão na mistura a coqueificar. Segundo SARCINELLI GARCIA⁽⁵⁰⁾ o teor de 20% de carvão metalúrgico nacional na mistura a coqueificar produz coque perfeitamente compatível em termos de qualidade para utilização no alto forno. Deve-se citar, também, que a diminuição do teor de enxofre na carga do alto forno possibilitará reduzir o volume de escória, quando não se tem outros problemas incidentes como de se balancear o teor de alumina.

7. VAZÃO ESPECÍFICA DOS GASES DE EXAUSTÃO

As figuras 5,6 e 7 mostram a vazão específica dos gases de exaustão durante a sinterização, nas condições normais de temperatura e pressão, de experiências realizadas com coque, carvão metalúrgico e carvão vegetal, respectivamente.

Nota-se que a vazão específica dos gases de exaustão diminuiu bruscamente logo após a ignição para valores situados entre 4,5 e 5,0Nm³/min dm² de área de grelha e permaneceu praticamente constante durante aproximadamente 2/3 do tempo de sinterização para depois aumentar gradativamente até o término da operação. A depressão sob grelha variou de 850 a 950 mm de coluna de água nesses 2/3 iniciais do tempo de sinterização. No fim da operação a vazão atingiu valores situados entre 8,0 e 9,0Nm³/mindm² de área de grelha. Comparando as Fig. 6 e 29 verificou-se que o início do aumento da vazão durante a sinterização corresponde aproximadamente ao instante que a "onda de combustão" atinge a interface carga-camada suporte.

Êsses resultados de 4,5 a 5,0Nm³/min dm² de área de grelha são da ordem de grandeza das vazões utilizadas na prática normal de sinterização, nos sistemas de operação intermitentes. WSCIEKLICA⁽⁹⁾, no seu trabalho, apresentou vazões específicas variando de 3,8 a 4,3Nm³/min dm² de área de grelha, nas operações de sinterização efetuadas em unidades industriais de operação intermitente (Greenawalt), para depressão sob grelha variando de 900 a 1200 mm de coluna de água. WENDEBORN e CAPPEL⁽⁵²⁾ mostraram, em experiências feitas com misturas de diferentes minérios, que a vazão específica dos gases de exaustão variou de 3,5 a 6,0Nm³/min dm² de área de grelha.

8. SÍNTER SEMI-REDUZIDO

Notou-se nas experiências realizadas para obtenção de sinter semi-reduzido que, devido ao alto teor de combustível, houve uma escorificação intensa da carga e este comportamento parece ter influenciado nos seguintes aspectos fundamentais: a) houve diminuição brusca da permeabilidade logo após a ignição devido à formação de um leito de escorificação e a formação deste leito foi tanto mais intensa quanto maior o teor de combustível. Com 20% de combustível a permeabilidade diminuiu gradativamente com o avanço da frente de sinterização e aumentou somente após a passagem das "ondas térmicas" pela interface carga-camada suporte. b) Houve envolvimento de algumas pelotas pela escória formada, sem no entanto ocorrer a dissolução completa destas.

Verificou-se que as partes metálicas eram principalmente constituídas de pelotas encobertas pela escória, provavelmente devido aos seguintes fatos: a combustão inicia-se intensamente na superfície das pelotas devido ao melhor aproveitamento do ar e à medida que a pelota fica encoberta de escória diminui a intensidade de combustão prevalecendo as condições redutoras. Antes mesmo das reações se completarem no interior das pelotas a escória envolvente já se solidifica, devido ao resfriamento pelo ar, o que contribui para impedir a reoxidação mais intensa. Deve-se mencionar também que enquanto prevalece as condições redutoras há um fluxo de gases produzidos do interior das pelotas que as protegem parcialmente contra a reoxidação.

Pode-se verificar na tabela XXVI que aumentando-se o teor de combustível aumentou-se o teor de ferro metálico, porém a proporcionalidade não é linear. Para 13, 16,5 e 20% de carvão metálico na carga obtiveram-se 2,2, 9,5 e 11,5% de teor de fer

ro metálico respectivamente. BROSCHE⁽²⁾ obteve resultados melhores (17 a 45% de ferro metálico) com matérias primas de granulometrias semelhantes porém com diferentes condições de operação.

Ainda na tabela XXVI verifica-se que o sinter semi-reduzido apresenta teores elevados de enxôfre. Os resultados mostram que o enxôfre inicialmente contido na carga ficou quase totalmente retido no sinter.

Este processo, com a devida ênfase que já foi dada pelo Prof. Dr. Carlos Dias Brosch⁽²⁾, poderá ter importantes consequências práticas e merece, por isso, uma atenção especial nas pesquisas para esclarecer ou confirmar os mecanismos que evitem ao máximo a reoxidação. A otimização do processo depende do esclarecimento desses aspectos fundamentais.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

1. O critério de máximo volume específico aparente para estimativa de umidade ótima é também eficaz para misturas que necessitem de micropelotização, desde que as micropelotas não apresentem degradação excessiva durante o munuseio.

2. Misturas que contenham proporção muito elevada de finos (mais que 10% de frações menores que 100 "mesh") podem apresentar dois ou mais máximos na curva do volume específico aparente em função da umidade. Nesses casos a umidade ótima a ser adotada deve ser aquêle que corresponde ao máximo volume específico aparente de carga micropelotizada.

3. Índices de intensidade de sinterização de cargas com carvão metalúrgico foram sensivelmente iguais aos correspondentes de cargas com coque quando as cargas continham os mesmos teores de carbono fixo. Assim, o consumo de carvão metalúrgico correspondeu aproximadamente à 60% mais que o coque. A produção unitária com carvão metalúrgico foi praticamente 20% inferior do que a obtida com coque.

4. Para cargas micro-pelotizadas as variações de umidade na mistura a sinterizar de até $\pm 0,5\%$ da umidade ótima, determinada pelo critério de volume específico aparente, não alteram de maneira significativa os índices de qualidade e de produção do sinter.

5. Nas sinterizações de minério de pureza elevada e sem adição de fundentes a intensidade de sinterização é influenciada mais pelo teor de cinza do combustível e sua composição do

que pela ganga do minério.

6. Os mecanismos de ligação das partículas, outras que a escorificação, têm importância secundária na sinterização do minérios hematíticos.

7. Para as condições adotadas nas experiências, a sinterização oxidante com carvão metalúrgico provocou eliminação superior a 85% de enxôfre inicialmente contido na carga.

CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFIA

- 1 - PINTO DE SOUZA, F.J. - "Aglomeração de minérios de ferro" - Conferência proferida em 16/8/69, na semana de estudos do Centro Acadêmico Horácio Lane da Universidade Mackenzie.
- 2 - BROSCHE, C.D. - "Novas técnicas de sinterização de matérias primas siderúrgicas, de interesse para as condições brasileiras" - Tese de concurso à cátedra da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - 1967.
- 3 - HARVENG, I. - "Mesure et réglage de l'humidité a l'atelier d'agglomération de la S.A. Cockerill-Ougrée-Providente, usine de Marchienne" - Revue de Metallurgie, 66º ano, nº 6, p. 465 - 470, junho 1969.
- 4 - ERPELDING, M.; NICK, D.; TROST, A.; CAPPEL, F. e NICKL, S. "Régulation de l'humidité d'un mélange a agglomérer avec une sonde a rétrodiffusion de neutrons" - Revue de Metallurgie, 66º ano, nº 7-8, p. 541-551, julho-agosto 1969.
- 5 - MACBRIAR, M.; ANDREWS, K.W. e DAVIES, W. - "The nature of Ironstone Sinter" - Journal of Iron and Steel Institute, v. 177, p. 316-323, julho 1954.
- 6 - Notas de aula do curso de pós graduação de "Aglomeração de Minérios", ministrado pelo Prof. Dr. Carlos Dias Brosch na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, no 2º semestre de 1968.

- 7 - BOUCRAUT, M. e ROCHAS, R. - "L'agglomération sur Grille des Mi
nerais de Fer - Revue de Metallurgie, 65º ano, nº 12, p. 835-844
dezembro 1968.
- 8 - WILD, R. - "Fundamental aspects of iron ore sintering" - IMM
Advances in extractive metallurgy, Symp, p. 17-20, abril 1967
e p. 73-88, abril 1968.
- 9 - WSCIEKLICA, J. - "Aspectos térmicos da sinterização com car-
vão vegetal" - ABM, Boletim, v. 18, nº 73, p. 939-955, novem
bro 1962.
- 10 - BOUCRAUT, M. e ROCHAS, R. - "Choise des caracteristiques d'
agglomération pour les minerais Lorrains" - Revue de Metallur
gie, 62º ano, nº 7-8 p. 631-634, 1965.
- 11 - COHEM, E. - "Radiographic Studies of the Process of Sintering
Iron Ores" - Journal of the Iron and Steel Institute, v. 175,
p. 160-166, outubro 1953.
- 12 - CHANG, M. C. - "Aglomeración de minérios de ferro" - ABM-Me -
talurgia, v. 23, nº 114, p. 337-343, maio 1967.
- 13 - VOICE, E.W.; BROOKS, S.H. e GLEDHILL, P. K. - "The permeabi
lity of sinter beds" - Journal of the Iron and Steel Institu
te, v. 174, parte 2, p. 136-139, junho 1953.
- 14 - KINSEY, F.W. e O'MALLEY, C.A. - "Sintering investigations
with pre-agglomerated burdens" - Trans. Met. Soc. AIME, v.
215, p. 1008-1014, dezembro 1959.

- 15 - VOICE, E.W.; BROOKS, S.H.; DAVIES, W. e ROBERTSON, B.L. -
"Factors controlling the rate of sinter Production" - Journal
of the Iron and Steel Institute, v. 175, parte 2, p. 97-152,
outubro 1953,
- 16 - BATES, H. - "Sinter-bed Ignition" - Journal of the Iron and
Steel Institute, v. 187, p. 310-314, dezembro 1957.
- 17 - ASTIER, J. - "Aglomeração e redução de minérios de ferro" -
ABM - metalurgia, v. 21, nº 89, p. 275-294, abril 1965.
- 18 - BALL, F. D. - "Pelletizing before sintering some experiments
with a disc" - Journal of the Iron and Steel Institute, v. 1
192, p. 40-55, maio 1959.
- 19 - BALDWIN, B.G. "The formation and decomposition of fayalite"-
Journal of Iron and Steel Institute, v. 177, p. 312-316, ju-
lho 1954.
- 20 - FERREIRA, J.V.; PENA, J.C. e MACHADO, D. - "Fatores que pro-
porcionaram aumento de produção na sinterização da Usiminas"
Trabalho apresentado no XXV Congresso Anual da ABM (Associa-
ção Brasileira de Metais) em Porto Alegre, julho 1970.
- 21 - BURLINGAME, R.D. - "Scrap increases sinter production" - Iron
Age, v. 193, p. 97-98, março 1964.
- 22 - ZWETKOFF, P. - "Doze anos na operação da sinterização de
Monlevade" - ABM-Boletim, v, 18, nº 68, p. 81-102, janeiro
1962.

- 23 - YATSUNAMI, K. - "Sintering for high productivity blast furnace operation" - Separata da Nippon Kokan Kabushiki Kaisha, a bil 1969.
- 24 - MORAES SARMENTO, A.C. - Comunicação Pessoal.
- 25 - WENDEBORN, H.B. - "Sintering as a physical process" - Journal of the Iron and Steel Institute, v. 175, parte 3. p. 280, novembro 1953.
- 26 - MIYAGAWA, K. "Effect of coke size on the productivity of iron ore sintering" - Tetsu to Hagane, v. 45, p. 922-924, setembro 1959. (Resumo).
- 27 - DIXON, K.G. - "Alternative fuels for sintering" - Journal of the Iron and Steel Institute, v. 200, p. 120-125, fevereiro 1962.
- 28 - SOUZA SANTOS, T.D. - "A influência de algumas variáveis sobre sinterização de minérios de ferro" - ABM-Boletim, v. 16, nº 59, p. 233-242, 1960.
- 29 - AGARWAL, J.C.; BHRANY, U.N.; JOHNSON, R.T. e MYRON, T.L. - "Effect of weather on sinter production" - AIME - Ironmaking conf. Proc. 22, p. 377-388, 1963 (Resumo).
- 30 - SOUZA SANTOS, T.D. e VERA, J.F. - "Influência de alguns fatores sobre a intensidade de sinterização de finos de hematita" - ABM-Boletim, v. 17, nº 67, p. 989-1010, 1961.

- 31 - GLEDHILL, P.K. e LANG, C. - "Sintering characteristics of a Cleveland Ironstone" - Journal of the Iron and Steel Institute, v. 184, p. 434-437, dezembro 1956.
- 32 - Manual de Operação da Yawata Iron and Steel Co., Separata sobre processo de sinterização, 1968.
- 33 - GRICE, M.A.K. e DAVIES, W. - "Towards Faster Sintering of Ironstone" - Journal of the Iron and Steel Institute, v. 175, p. 155-160, outubro 1953.
- 34 - LEBEDEV, A.E. - "Intensification of the Process of Iron Ores" Metallurg, 1957, (5), 10 (Resumo).
- 35 - "French Get Two-Layer Sinter Plant" - Steel, v. 141, nº 26, p. 74-76, 23 de dezembro 1957.
- 36 - The Making, Shaping and Treating of Steel - Publicação da United States Steel Corporation, p. 188, 8ª. edição, 1964.
- 37 - ASTIER, J. - "Standardization of testes of physical resistance of sinter" - Centre Doc. Sider. Circ. nº 6, p. 1493-1499, 1964.
- 38 - CZAICO, C.A. e MORAES SARMENTO, A.C. - "Ensaio de sinterização na instalação piloto da COSIPA" - ABM-Metalurgia, v. 25, nº 145, p. 911-922, dezembro 1969.
- 39 - SALAMATOV, L.G. - "Optimum method for the cooling and screening of sinter" - Stal in English (6), p. 467, 1968.

- 40 - SOUZA SANTOS, T.D. - "Tumbling resistance and reducibility - test for evaluating nickel silicate ore sinters" - Agglomeration, editado por William A. Knepper, Interscience Publishers, 1962, p. 133-145.
- 41 - ASTM - Standarts - Concrete and mineral aggregates, Parte 10 outubro 1965. ASTM - D289 - 63 "Abrasion of graded coarse aggregate by use of the Deval Machine" p. 393.
- 42 - RIZZO, H.P.; BROSCH, C.D. e CORREA DA SILVA, L.C. - Ensaio de redutibilidade de minério de ferro e seus aglomerados. Estudo de um novo tipo de ensaio" - ABM-metalurgia, v. 23, nº 111, p. 82-98, fevereiro 1967.
- 43 - RIZZO, H.P. e BROSCH, C.D. - "Caracteres de redutibilidade de alguns sinteres de minério de ferro brasileiro" - ABM - Metalurgia, v. 24, nº 123, p. 145-147, fevereiro 1968.
- 44 - MAZANEK, E.; JASIENSKA, S.; BARTASZ, F. e KOPEC, R. - "The structure and phase composition of self-fluxing sinters" - Arch Hutn, (4), 7, p. 305-318, 1962 (Resumo).
- 45 - GIEDROYC, V. - "Removal of Sulphur during Iron-Ore Sintering" Journal of the Iron and Steel Institute, v. 180, p. 129-139 junho 1955.
- 46 - BYKOV, M.S. - "The removal of sulphur during the sintering of magnetite iron ores and concentrates having a magnesia gangue" - Part I, Citado no Journal of the Iron and Steel Institute, v. 205 p. 783, julho 1967.

- 47 - Notas de aula do curso de pós-graduação de "Físico-química - das reações metal-escória aplicada à fabricação de aços", ministrado pelo Prof. Dr. David Gonçalves de Oliveira, na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, no 2º semestre de 1968.
- 48 - VOICE, E.W. e WILD, R. - "A Laboratory Study of the Sinteting Process" - Journal of the Iron and Steel Institute, v. 183, nº 3 p. 404-410, agosto 1956.
- 49 - SOUZA SANTOS, T.D. e BRESCIANI, S. - "Intensidade de sinterização e redutibilidade de sinters de garnierita" - ABM-Boletim, v. 17, nº 62, p. 133, janeiro 1961.
- 50 - SARCINELLI GARCIA, L.F. - Discussão na reunião aberta sobre "A operação do alto forno e o consumo de combustível" - ABM Metalurgia, v. 26, nº 150, p. 353, maio 1970.
- 51 - BRANDES, G.; STRUVE, G.V. e JANKE, W. - "O aproveitamento dos finos de minérios brasileiros de alto teor de ferro" - ABM-Metalurgia, v. 21, nº 90, p. 355-368, maio 1965.
- 52 - WENDEBORN, H. e CAPPEL, F. - "Limits of the physical aspects of sinter process" - Agglomeration, editado por William A. Knepper, Interscience Publishers, 1962, p. 1047.
- 53 - KULIKOV, I.S. e KOMISSAROV, G.M. - "Thermodynamic analysis of the behaviour of sulphur in the sintering of iron ores" Citado no Journal of the Iron Steel Institute, v. 203, p. 842, 1965.

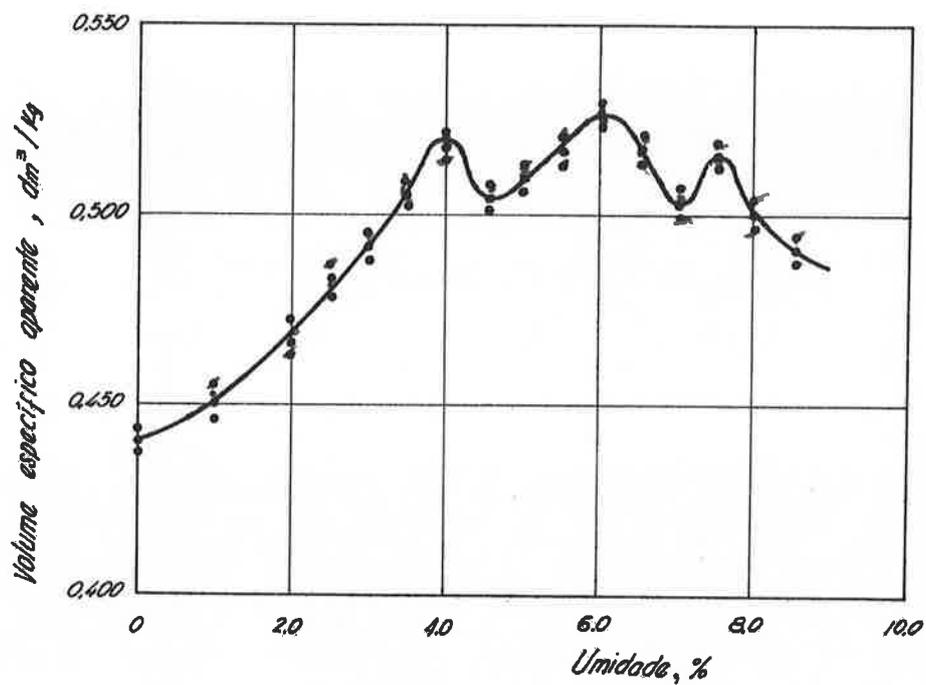


Fig. 4 - Variação do volume específico aparente com o teor de umidade.

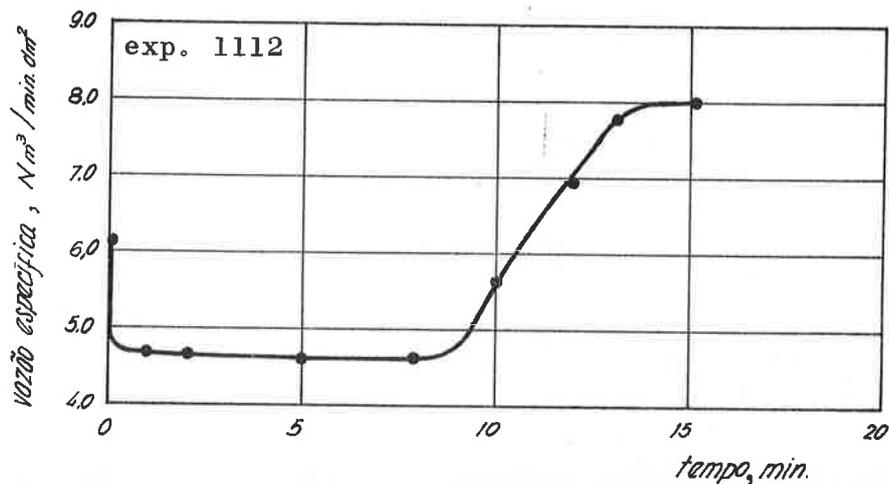


Fig. 5 - Variação da vazão específica dos gases de exaustão durante o ensaio de sinterização com 4,0% de coque.

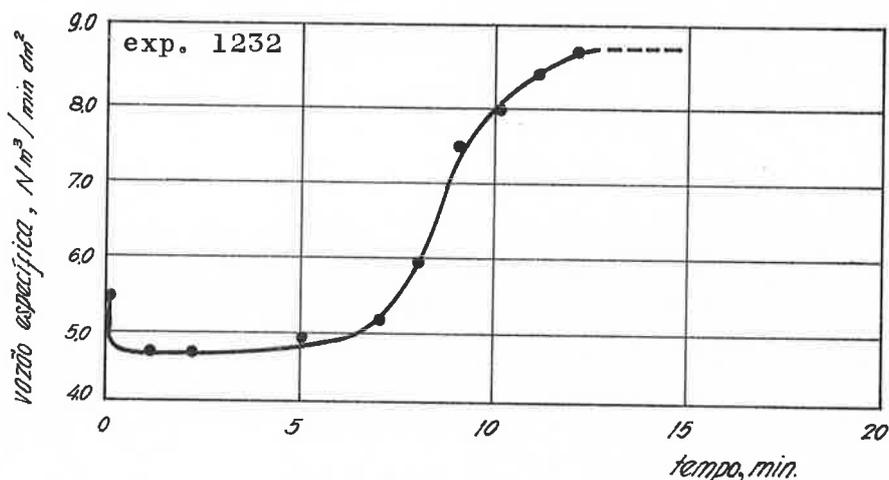


Fig. 6 - Variação da vazão específica dos gases de exaustão durante o ensaio de sinterização com 8,5% de carvão metalúrgico.

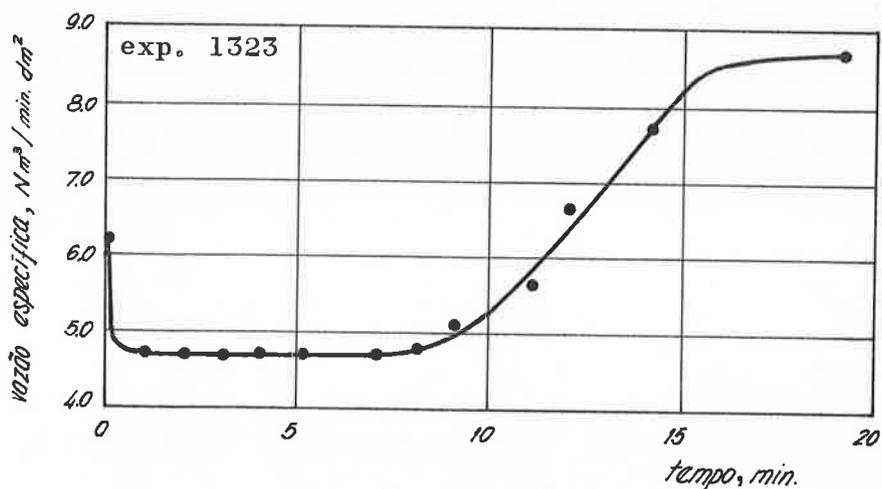


Fig. 7 - Variação da vazão específica dos gases de exaustão durante o ensaio de sinterização com 5,7% de carvão vegetal.

Fig. 8 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 7,30% de carvão metalúrgico e 6,0% de umidade, Posições dos termopares: 1 - na interface carga camada suporte; 2 - a 140mm acima da primeira e 3 - a 280mm acima da primeira.

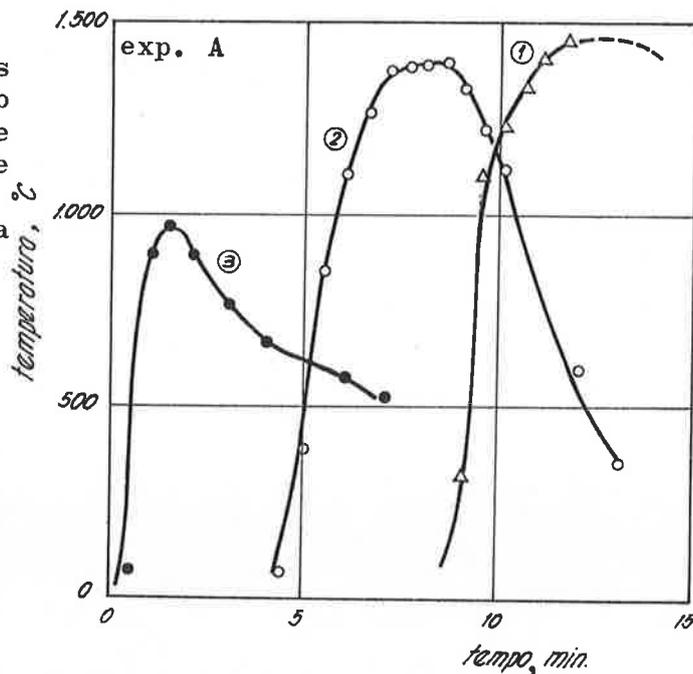


Fig. 9 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 7,30% de carvão metalúrgico e 6,0% de umidade. Posições dos termopares: as mesmas da Fig. 8.

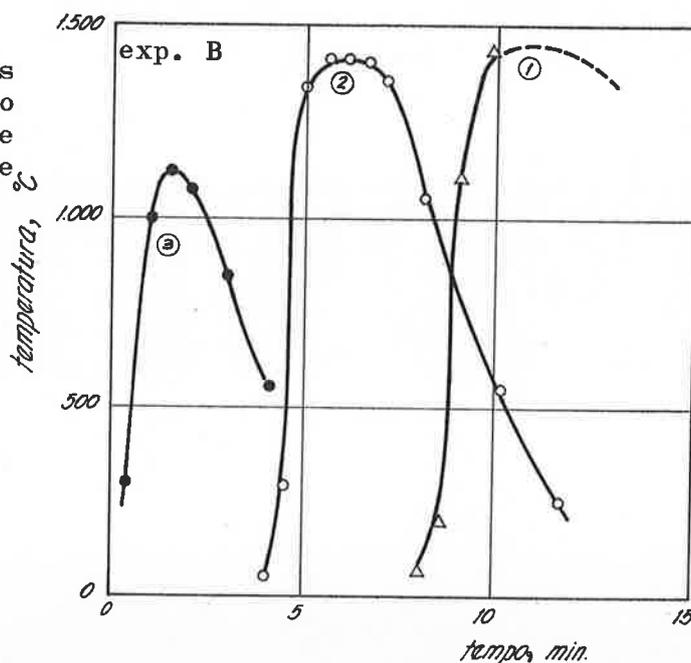


Fig. 10 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 7,30% de carvão metalúrgico e 6,0% de umidade. Posições dos termopares: as mesmas da Fig. 8.

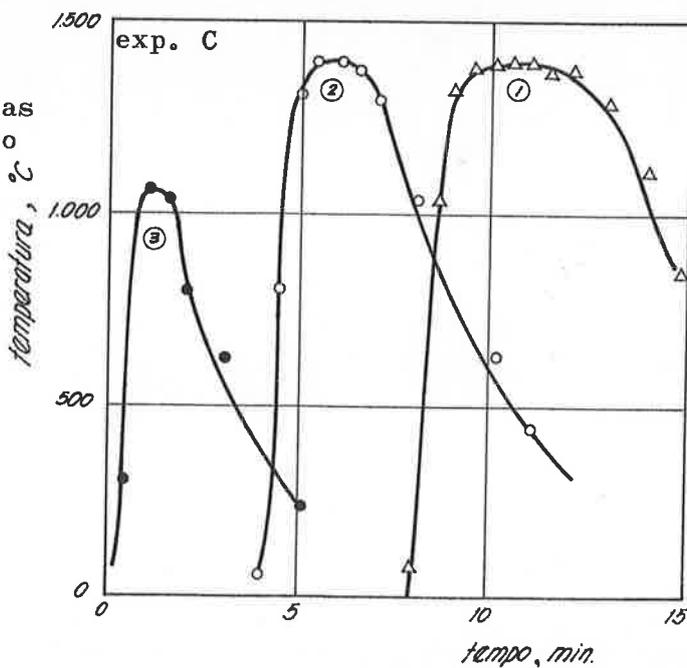


Fig. 11 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 7,30% de carvão metalúrgico e 6,0% de umidade. Posições dos termopares: 1 - na interface carga camada suporte; 2 - a 140 mm acima da primeira e 3 - a 280 mm acima da primeira.

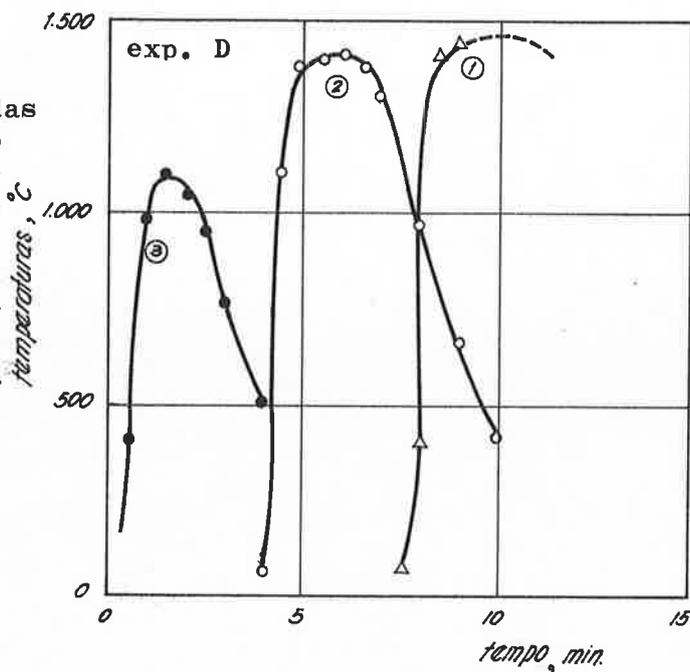


Fig. 12 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 7,30% de carvão metalúrgico e 6,0% de umidade. Posições dos termopares: as mesmas da figura acima.

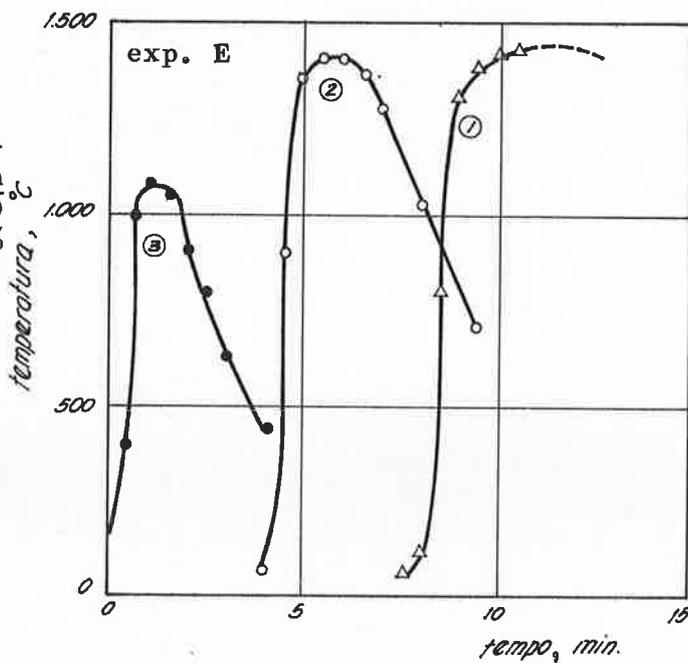


Fig. 13 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 4,0% de coque e 5,5% de umidade. Posições dos termopares: 1 - na interface carga camada suporte; 2 - a 140mm acima da primeira e 3 - a 280 mm acima da primeira.

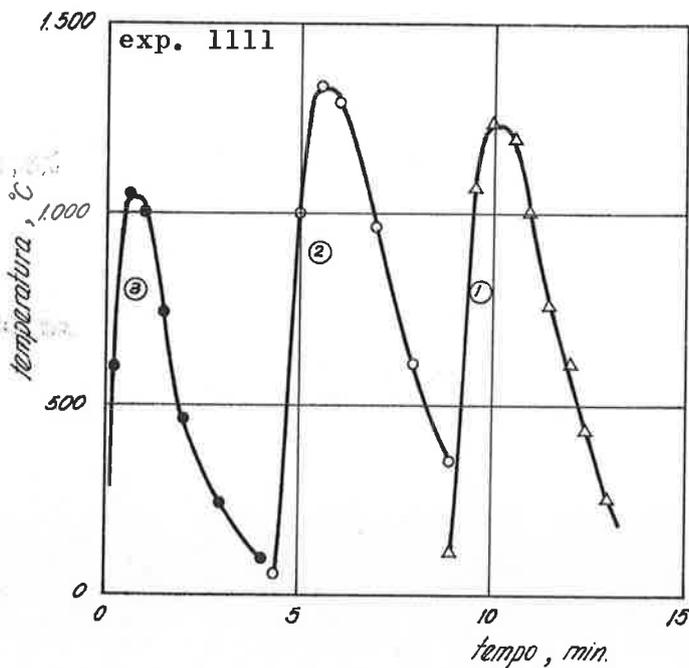


Fig. 14 - Como acima, com 6% de umidade.

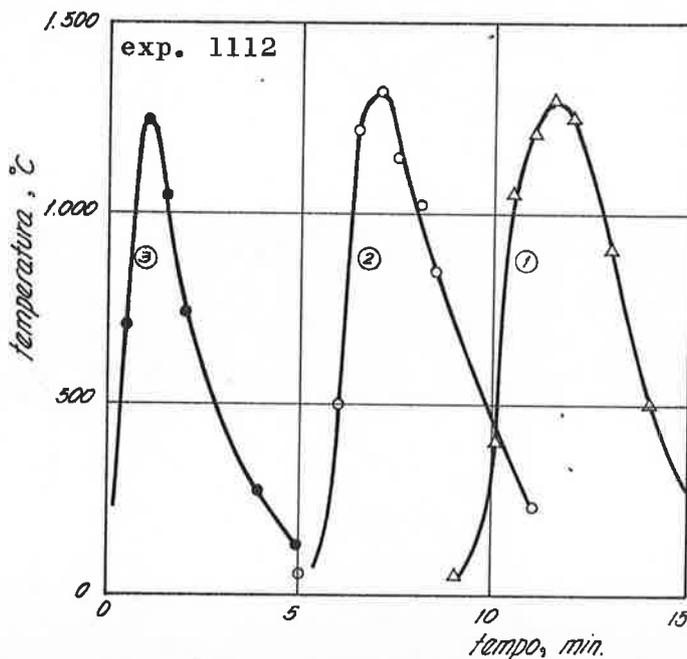


Fig. 15 - Como acima, com 6,5% de umidade.

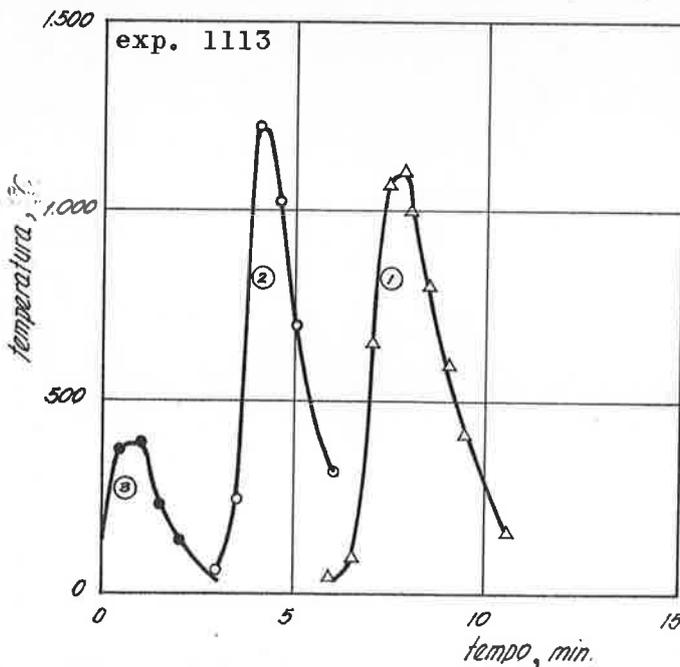


Fig. 16 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 4,75% de coque e 5,5% de umidade. Posições dos termopares: 1 - na interface carga-camada suporte; 2 - à 140 mm acima da primeira e 3 - a 280 mm acima da primeira.

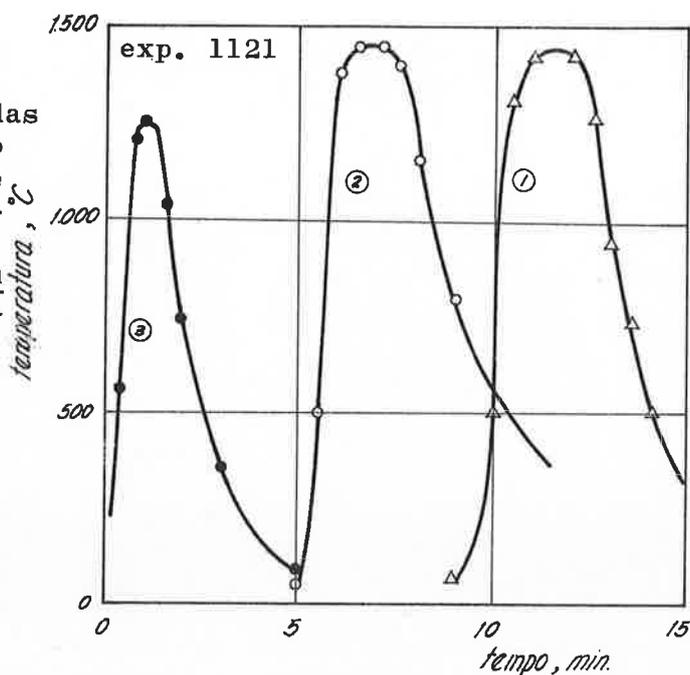


Fig. 17 - Como acima, com 6,0% de umidade.

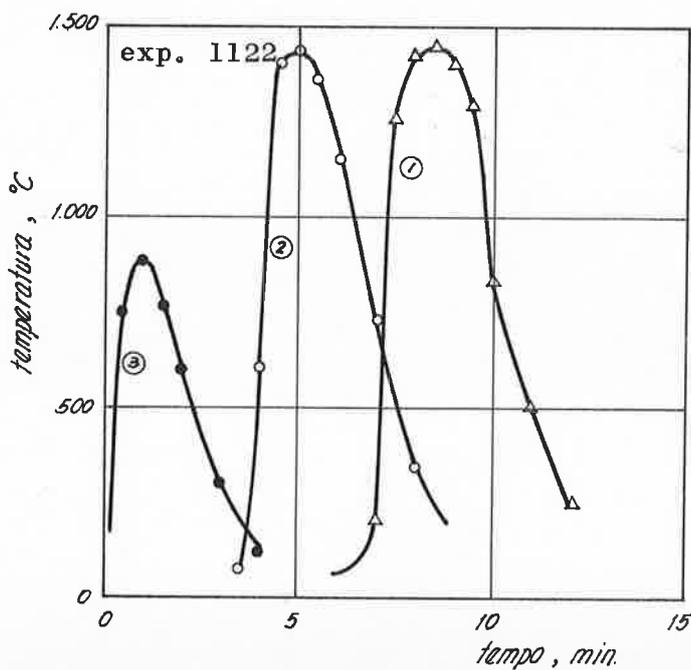


Fig. 18 - Como acima, com 6,5% de umidade.

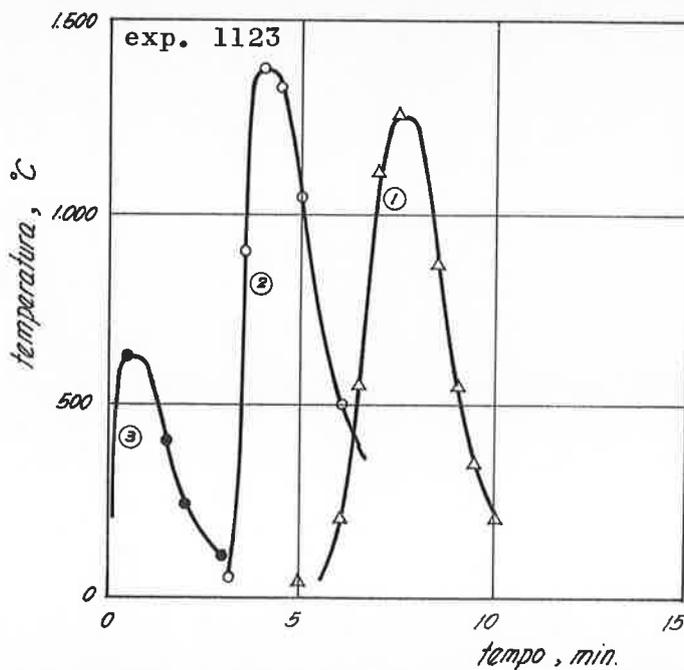


Fig. 19 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 5,5% de coque e 5,5% de umidade. Posições dos termopares: 1 - na interface carga camada suporte; 2 - a 140 mm acima da primeira e 3 - a 280 mm acima da primeira.

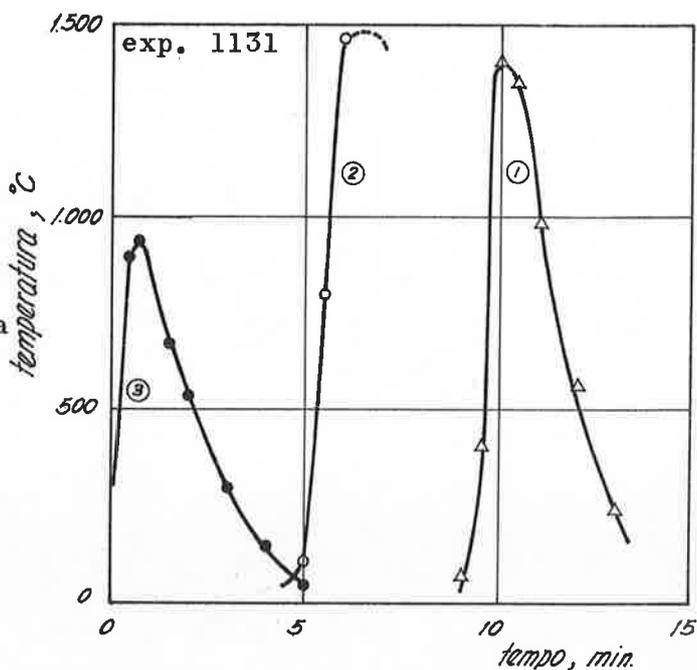


Fig. 20 - Como acima, com 6,0% de umidade.

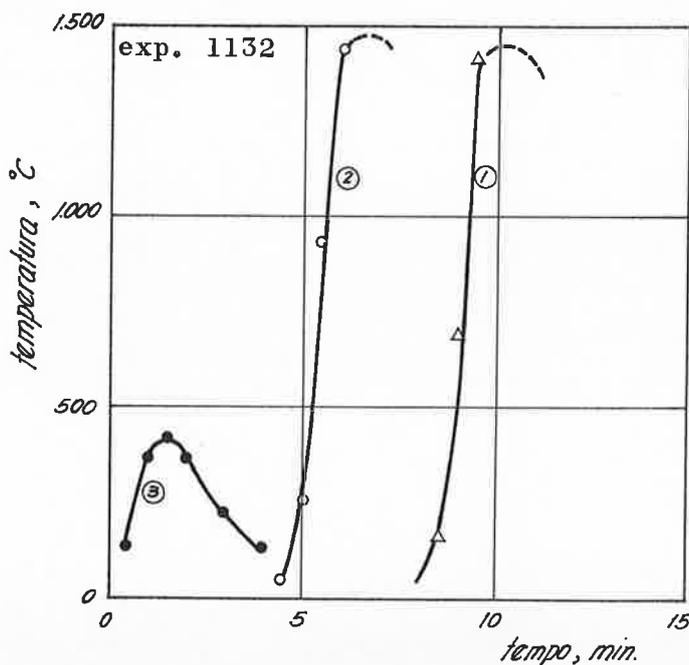


Fig. 21 - Como acima, com 6,5% de umidade.

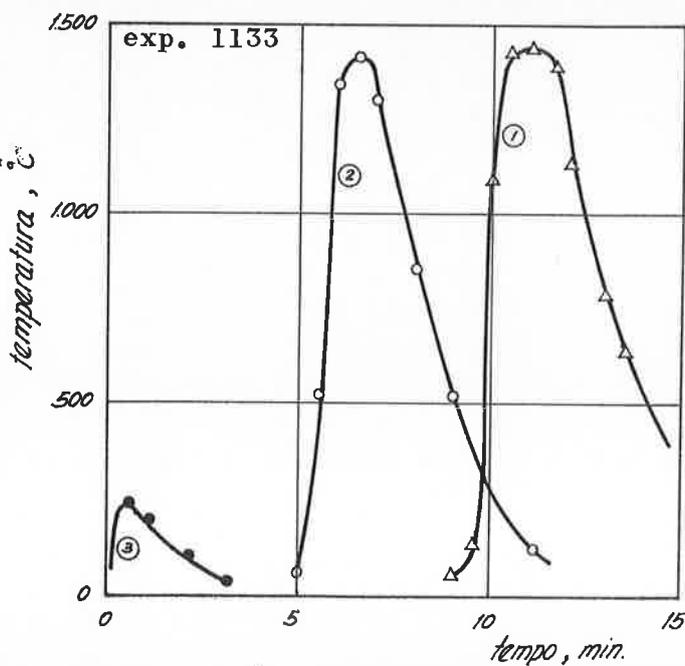


Fig. 22 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 6,2% de carvão metalúrgico e 5,5% de umidade. Posições dos termopares: 1 - na interface carga-camaga suporte; 2 - a 140 mm acima da primeira e 3 - a 280 mm acima da primeira.

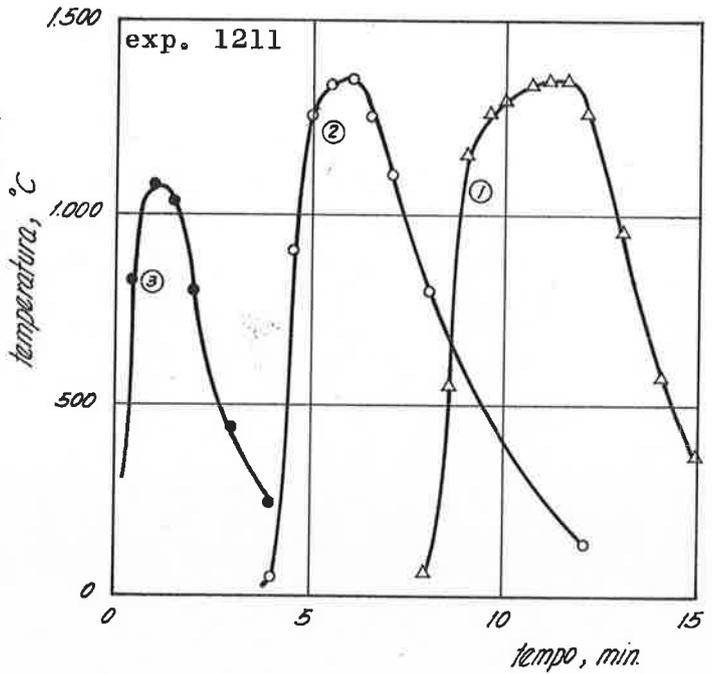


Fig. 23 - Como acima, com 6,0% de umidade.

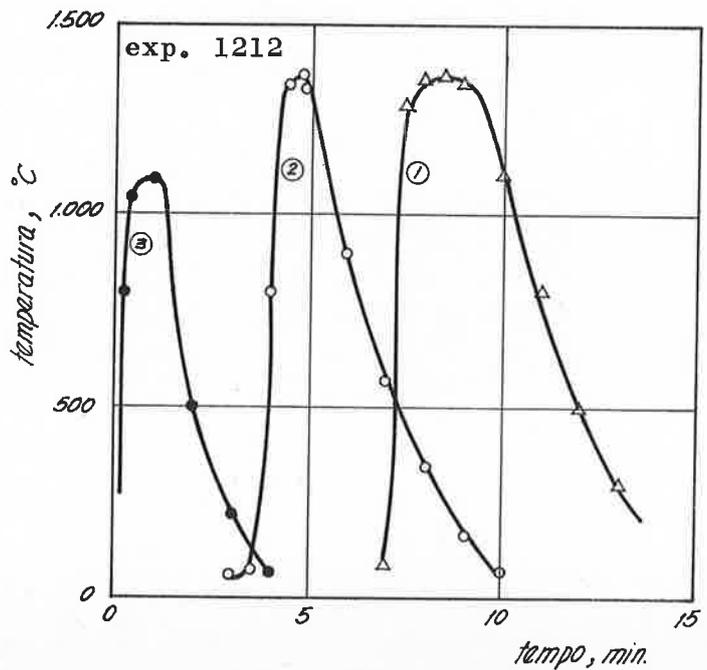


Fig. 24 - Como acima, com 6,5% de umidade.

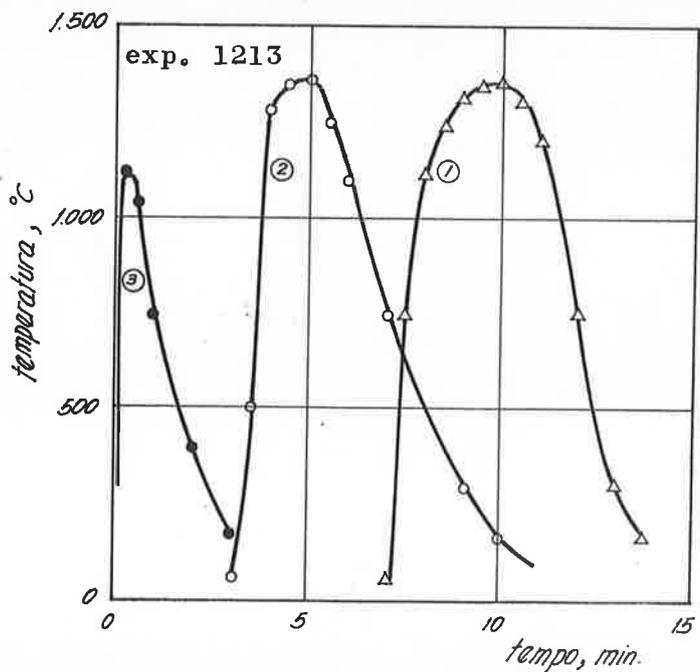


Fig. 25 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 7,30% de carvão metalúrgico e 5,5% de umidade. Posições dos termopares: 1 - na interface carga-camada suporte; 2 - a 140 mm acima da primeira.

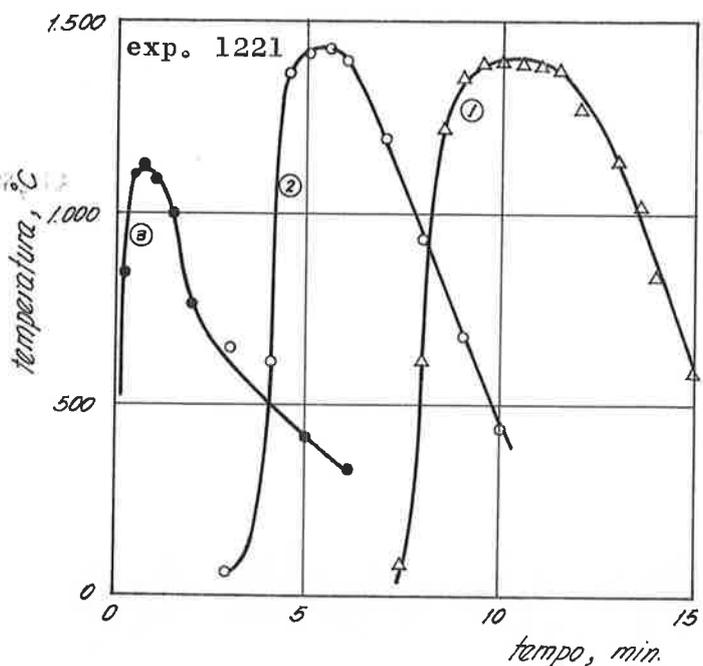


Fig. 26 - Como acima, com 6,0% de umidade

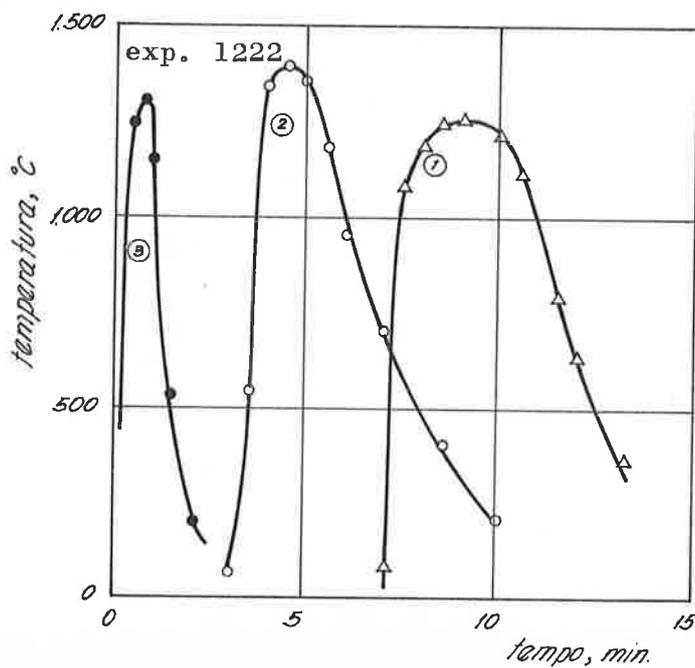


Fig. 27 - Como acima, com 6,5% de umidade.

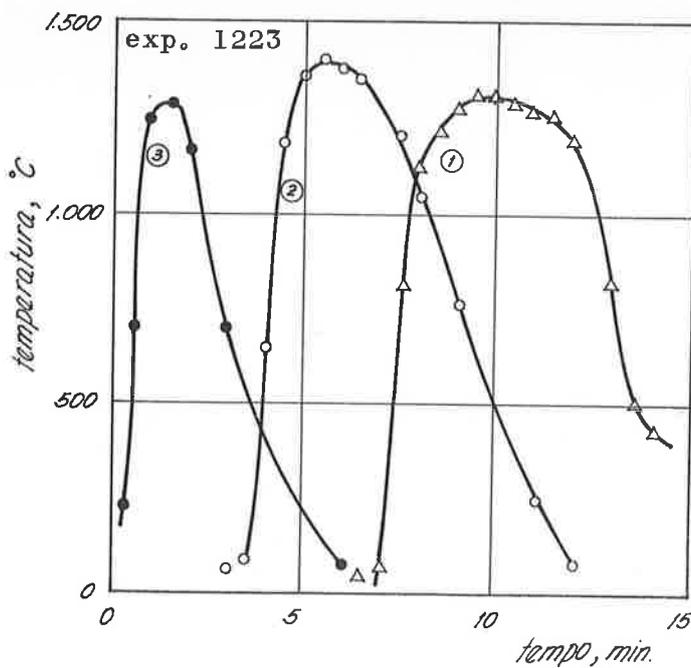


Fig. 28 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 8,5% de carvão metalúrgico e 5,5% de umidade. Posições dos termopares: 1 - na interface carga-camada suporte; 2 - a 140 mm acima da primeira e 3 - a 280 mm acima da primeira.

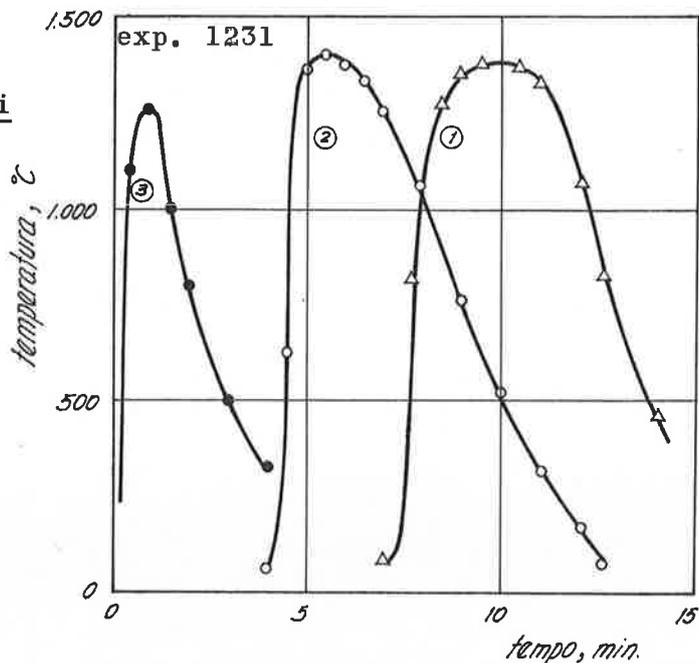


Fig. 29 - Como acima, com 6,0% de umidade.

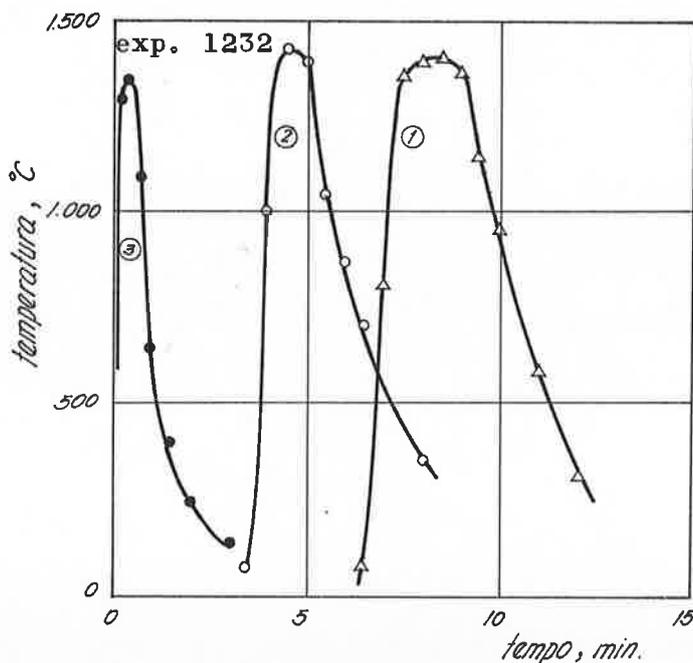


Fig. 30 - Como acima, com 6,5% de umidade.

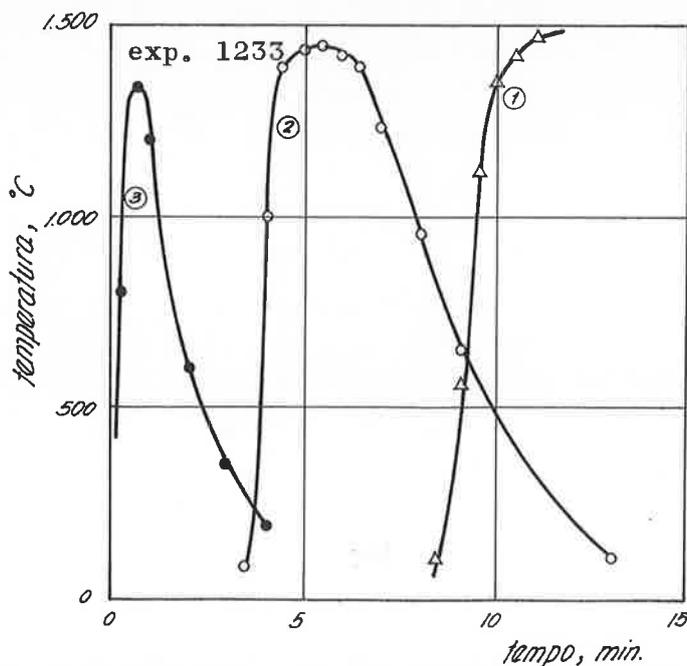


Fig. 31 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 9,0% de carvão metalúrgico e 5,5% de umidade. Posições dos termopares: 1 - na interface carga-camada suporte; 2 - a 140 mm acima da primeira e 3 - a 280 mm acima da primeira.

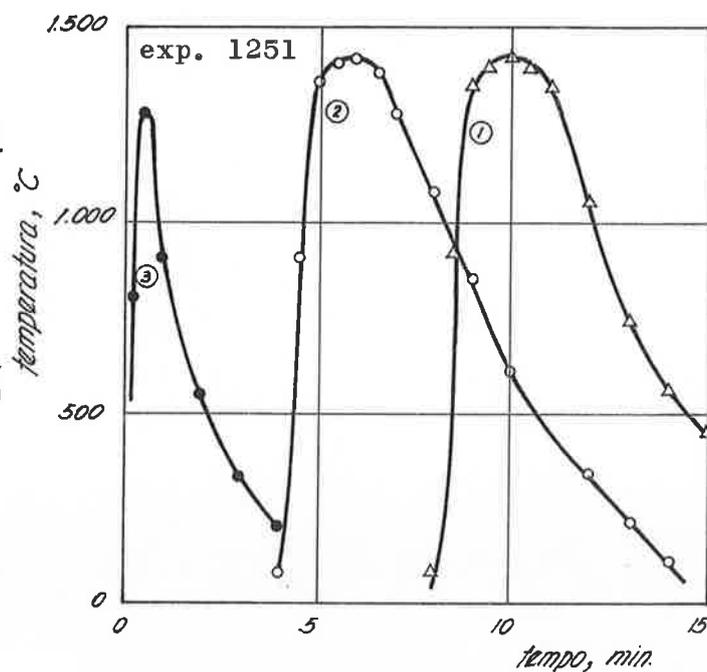


Fig. 32 - Como acima, com 6,0% de umidade.

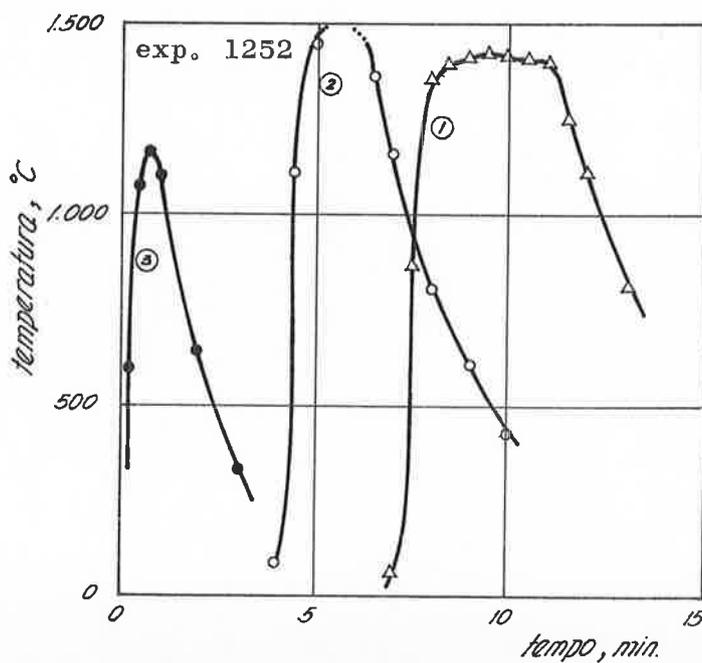


Fig. 33 - Como acima, com 6,5% de umidade.

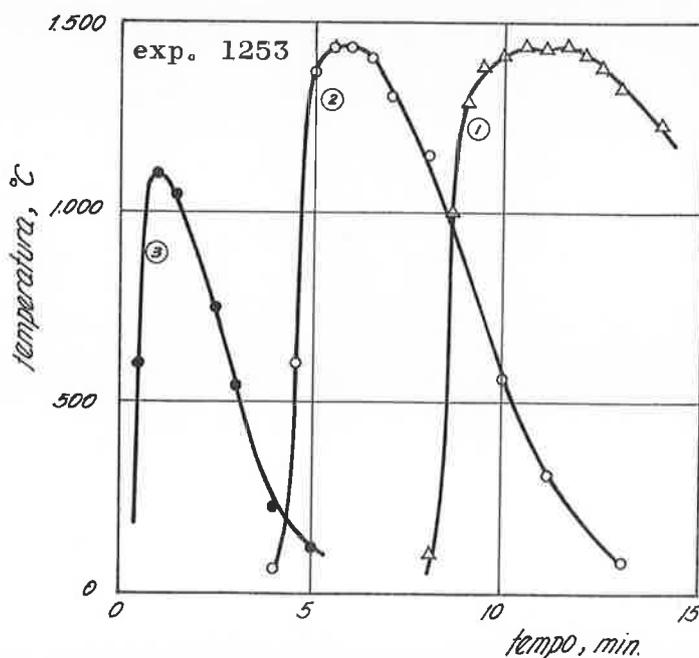


Fig. 34 - Temperaturas obtidas em função do tempo em ensaio de sinterização com 8,5% de carvão metalúrgico e 5,5% de umidade. Mistura feita na betoneira. Posições dos termopares: 1 - na interface carga-camada suporte; 2 - a 140 acima da primeira e 3 - a 280 mm acima da primeira.

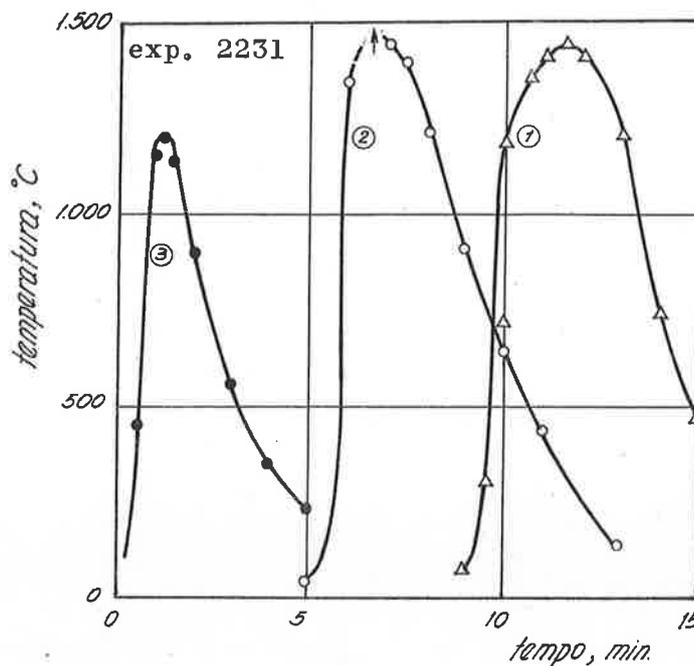


Fig. 35 - Como acima, com 6,0% de umidade.

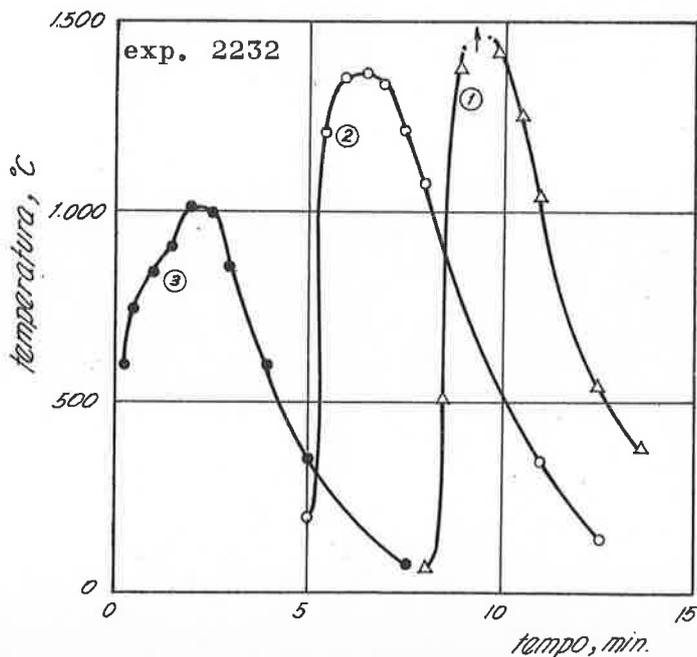


Fig. 36 - Como acima, com 6,5% de umidade.

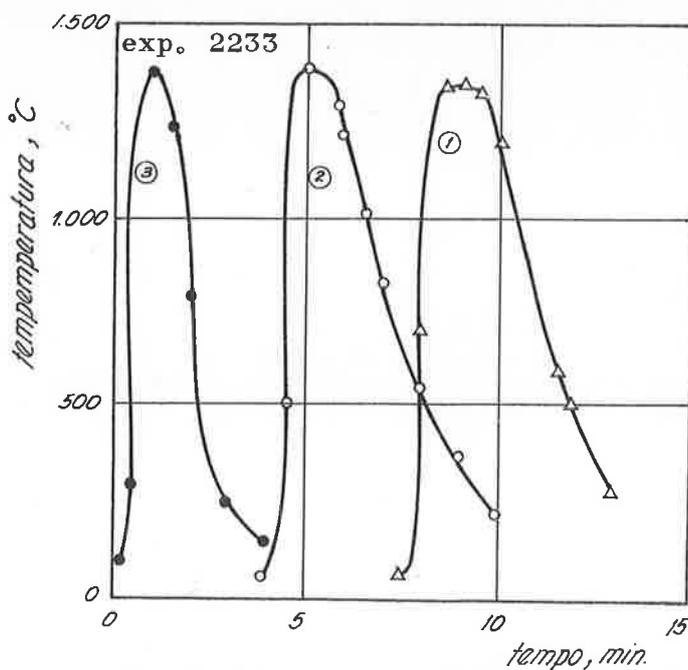


Fig. 37 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 8,5% de carvão metalúrgico e 5,5% de umidade. Mistura feita na betoneira com adição do combustível somente na etapa final, Posições dos termopares: 1 - na interface carga-camada suporte; 2 - a 140 mm acima da primeira e 3 - a 280 mm acima da primeira.

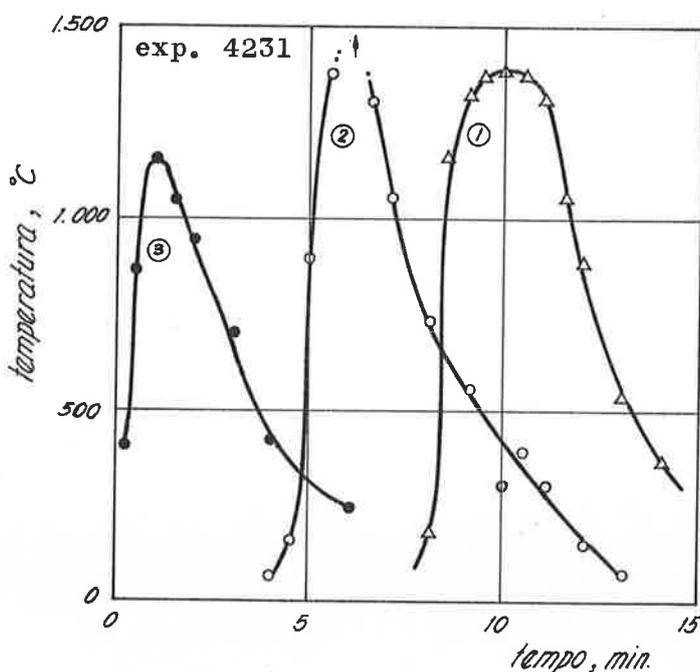


Fig. 38 - Como acima, com 6,0% de umidade.

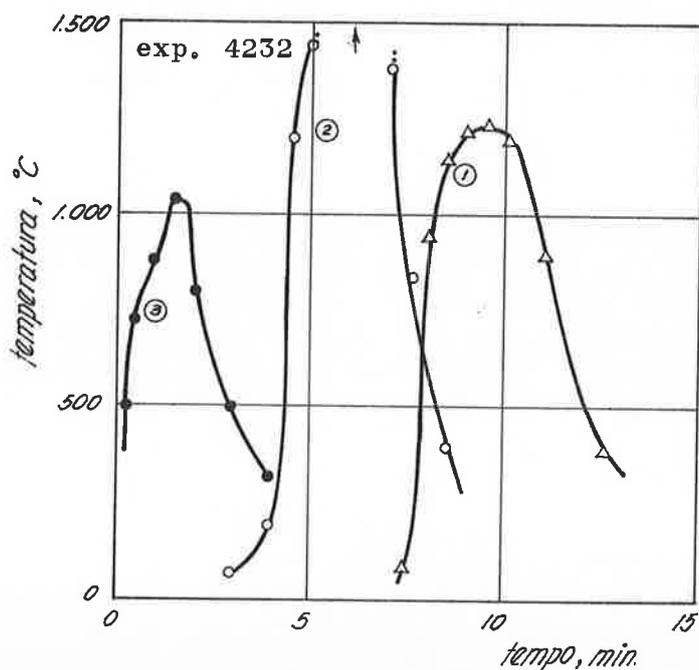


Fig. 39 - Como acima, com 6,5% de umidade.

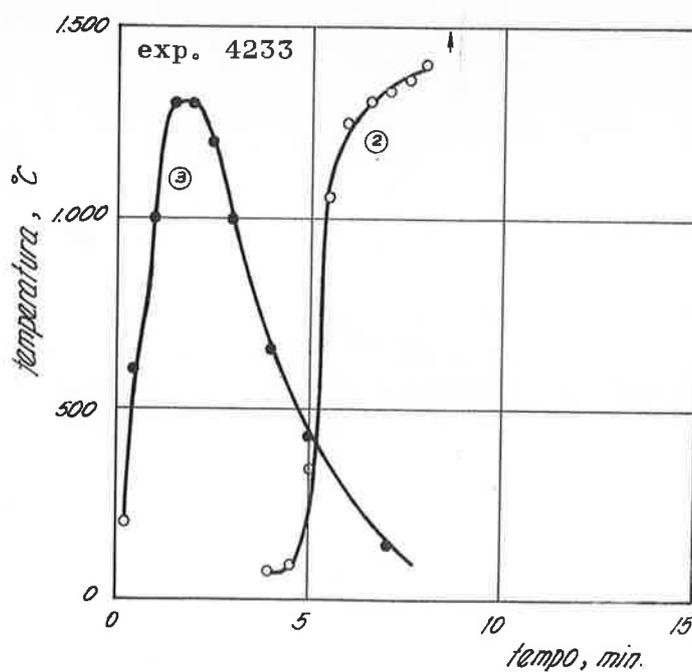


Fig. 40 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 5,7% de carvão vegetal e 5,5% de umidade. Posições dos termopares: 1 - na interface carga-camada suporte; 2 - a 140 mm acima da primeira e 3 - a 280 mm acima da primeira.

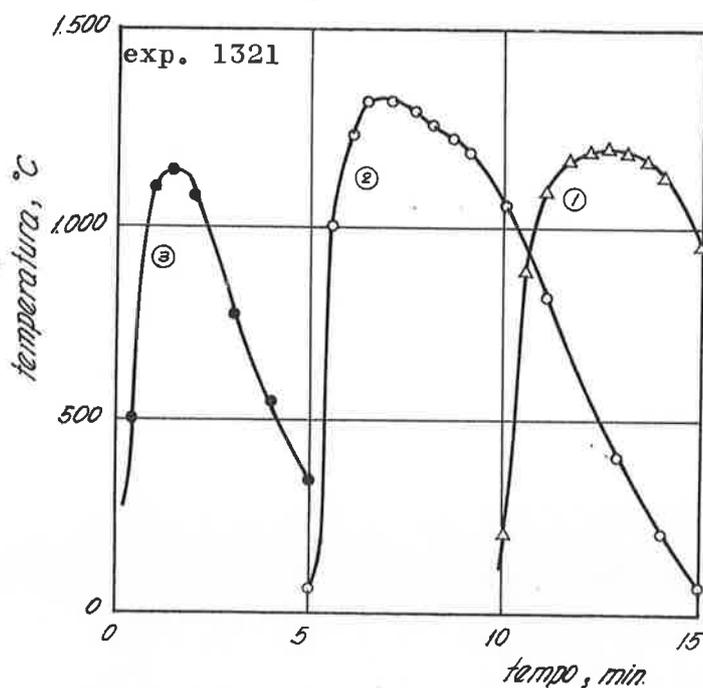


Fig. 41 - Como acima, com 6,0% de umidade.

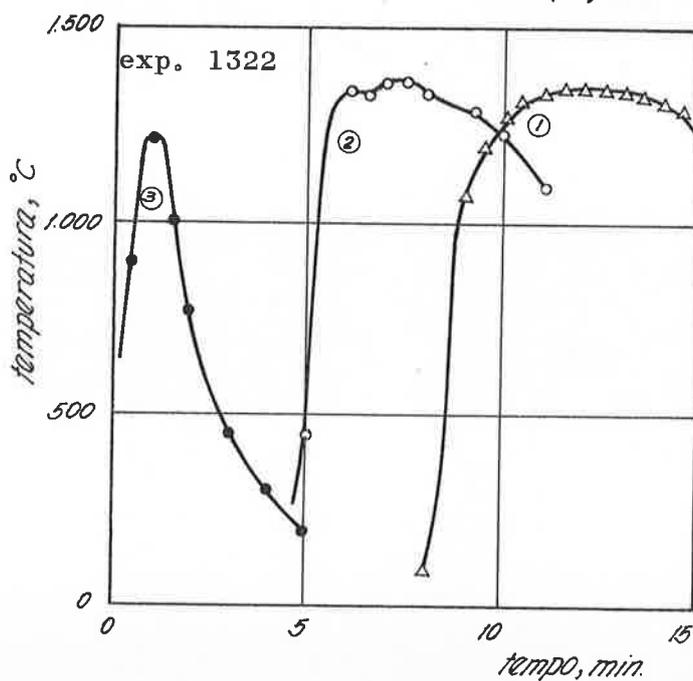


Fig. 42 - Como acima, com 6,5% de umidade.

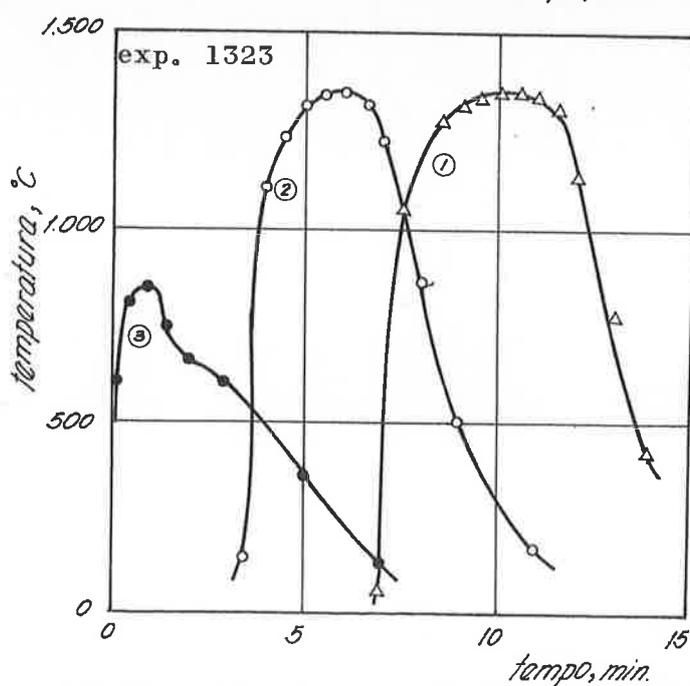


Fig. 43 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 6,6% de carvão vegetal e 5,5% de umidade. Posições dos termopares: 1 - na interface carga-camada suporte; 2 - a 140 mm acima da primeira e 3 - a 280 mm acima da primeira.

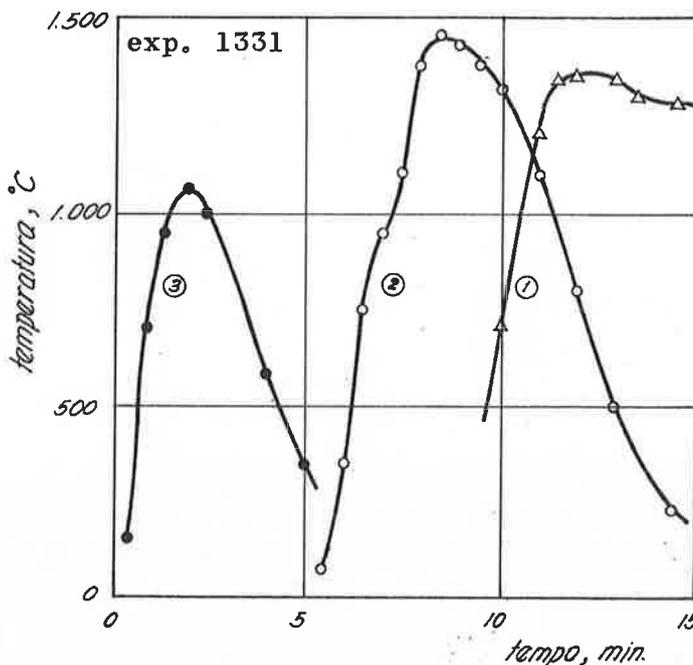


Fig. 44 - Como acima, com 6,0% de umidade.

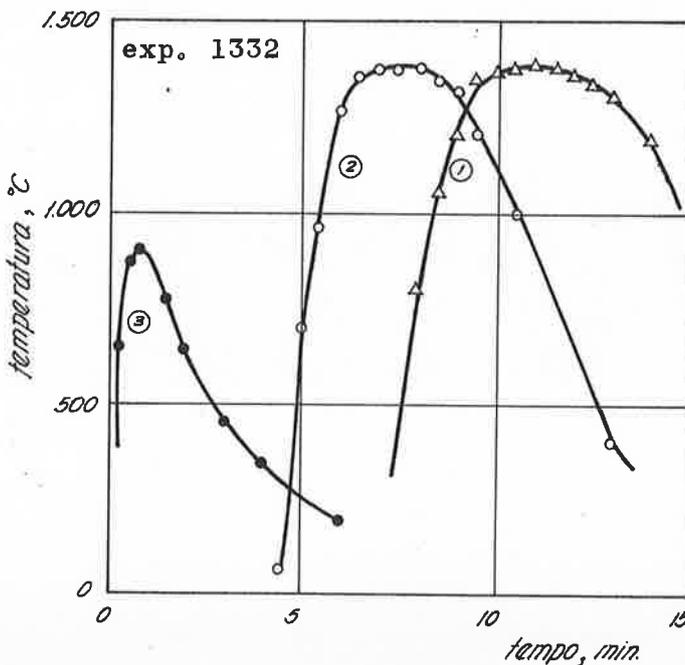
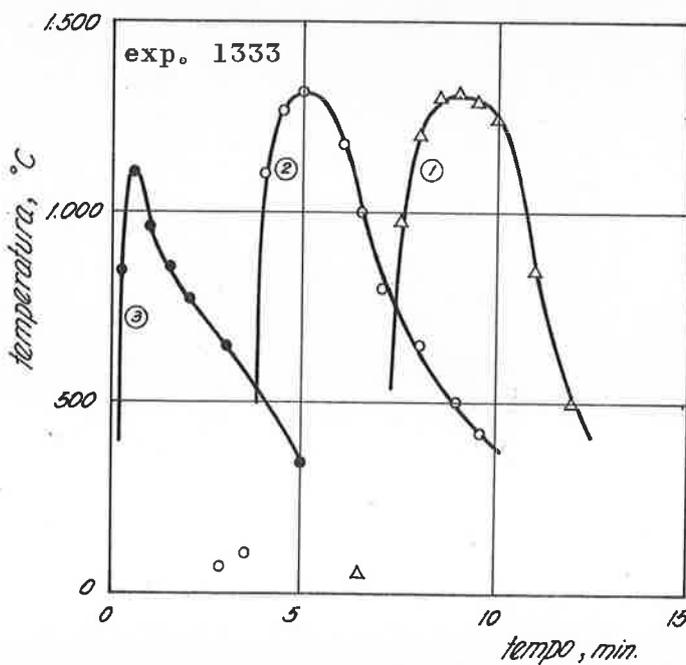


Fig. 45 - Como acima, com 6,5% de umidade.



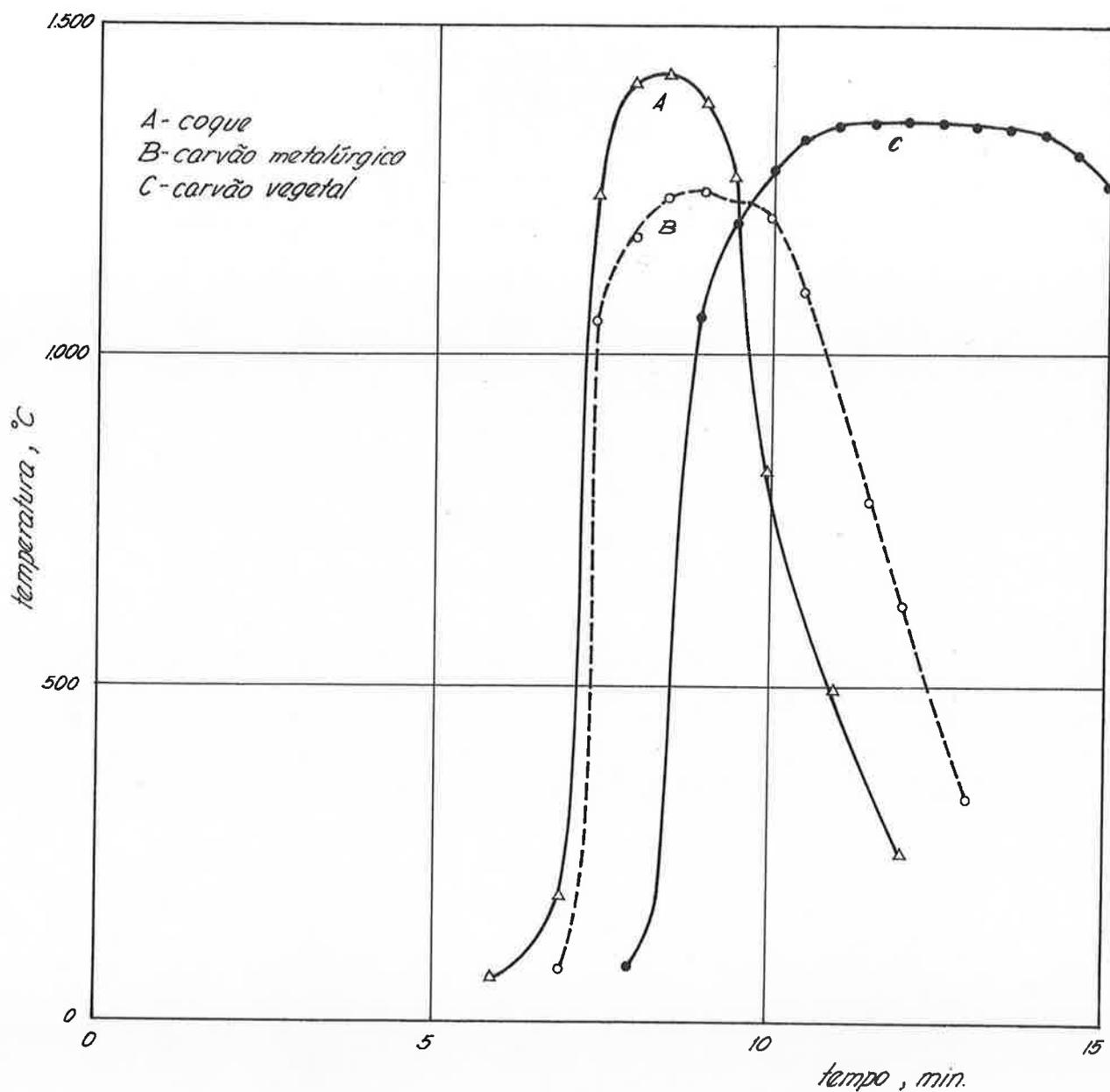


Fig. 46 - Comparação das curvas térmicas das figuras 17, 26 e 41. Posição do termopar na interface carga-camada suporte. A: 4,75% de coque (exp. 1122); B: 6,2% de carvão metalúrgico (exp. 1222) e C: 5,7% de carvão vegetal (exp. 1322).

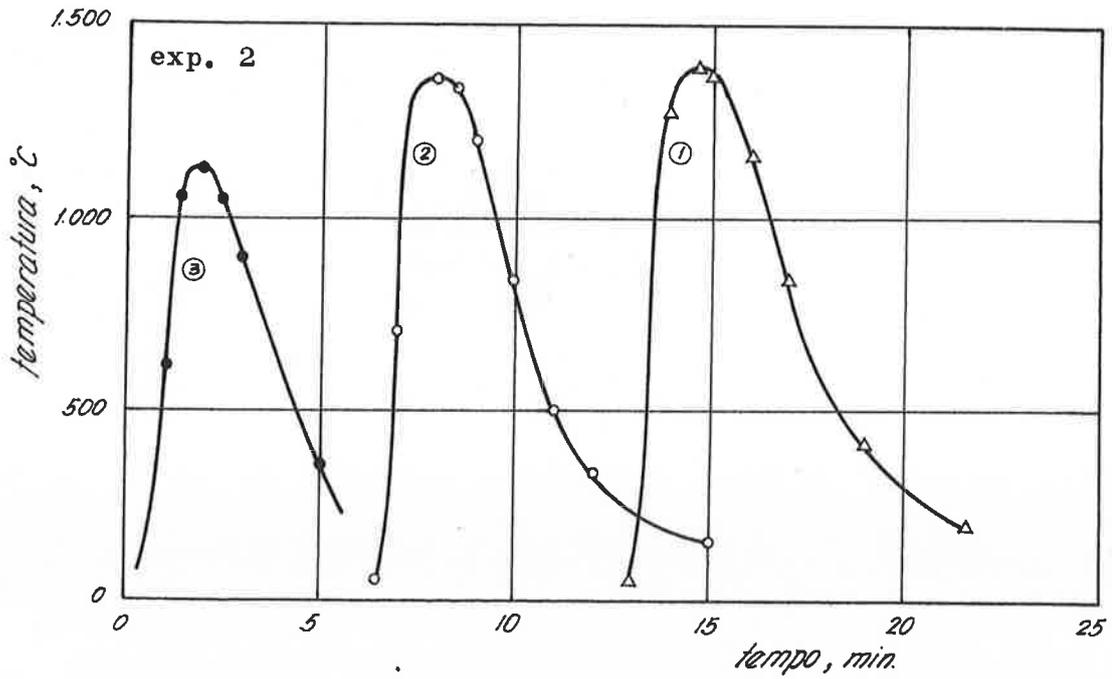


Fig. 47 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 4,5% de coque (C), 4,5% de umidade, minério M e 20% de finos de retôrno. Posições dos termopares: 1 - na interface carga-camada suporte; 2 - a 140 mm da primeira e 3 - a 280 mm da primeira.

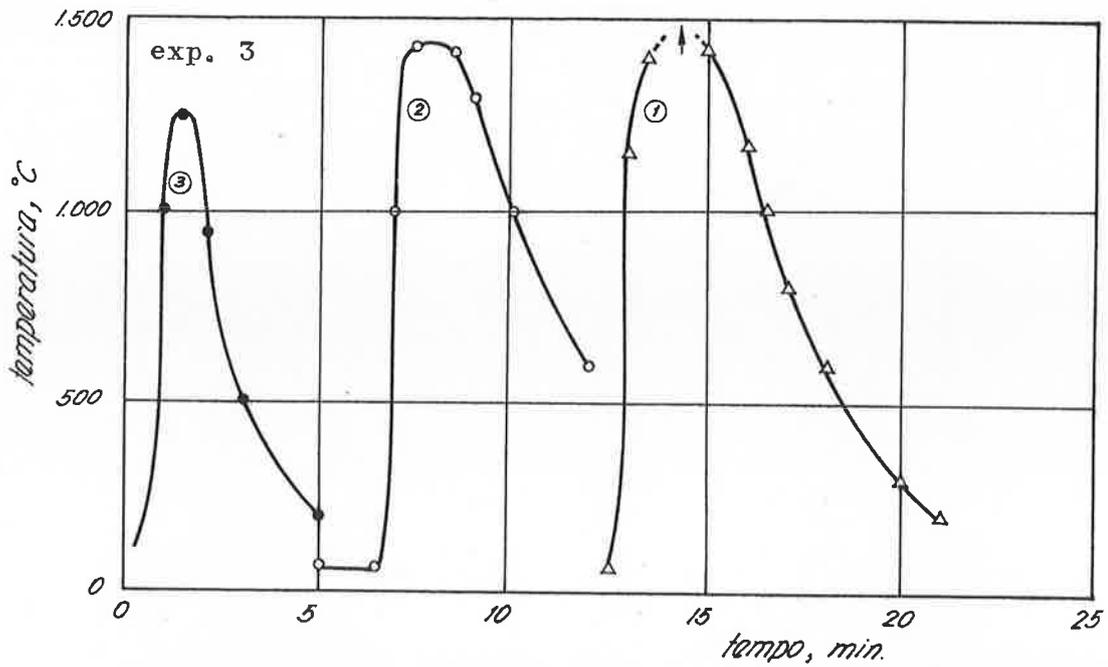


Fig. 48 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 5,5% de coque (C), 4,5% de umidade, minério M e 20% de finos de retôrno. Posições dos termopares: 1 - na interface carga-camada suporte; 2 - a 140 mm da primeira e 3 - a 280 mm da primeira.

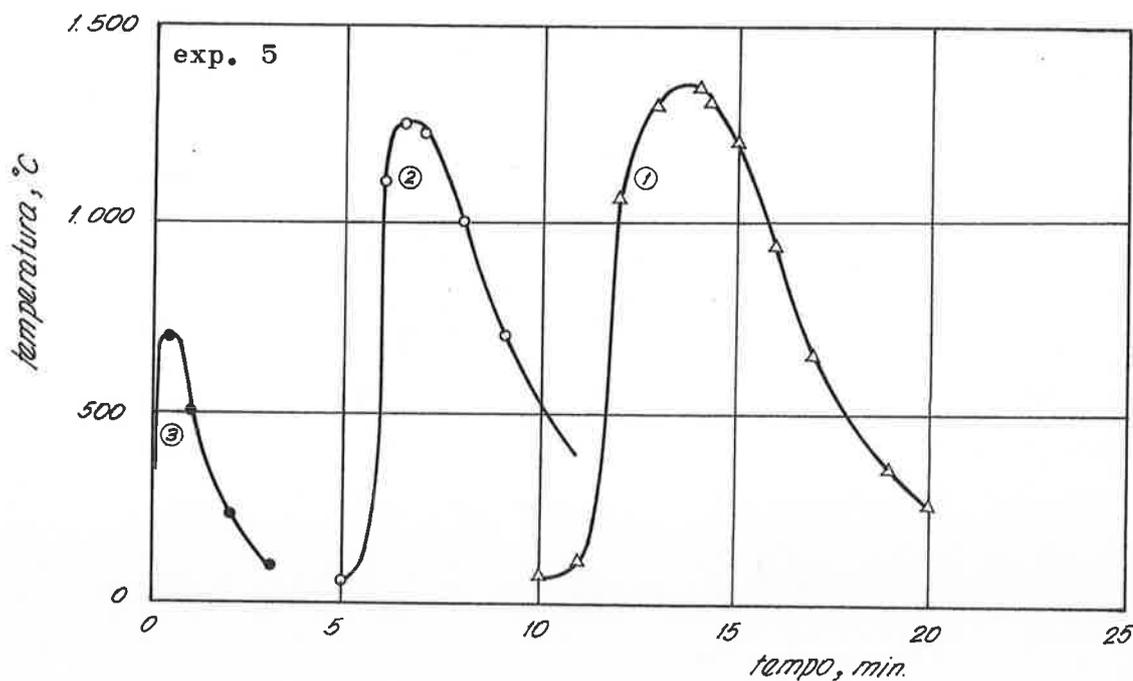


Fig. 49 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 4,2% de carvão metalúrgico (CM), 5,0% de umidade, minério M e 20% de finos de retôrno. Posições dos termopares: 1 - na interface carga-camada suporte; 2 - à 140 mm da primeira e 3 - a 280 mm da primeira.

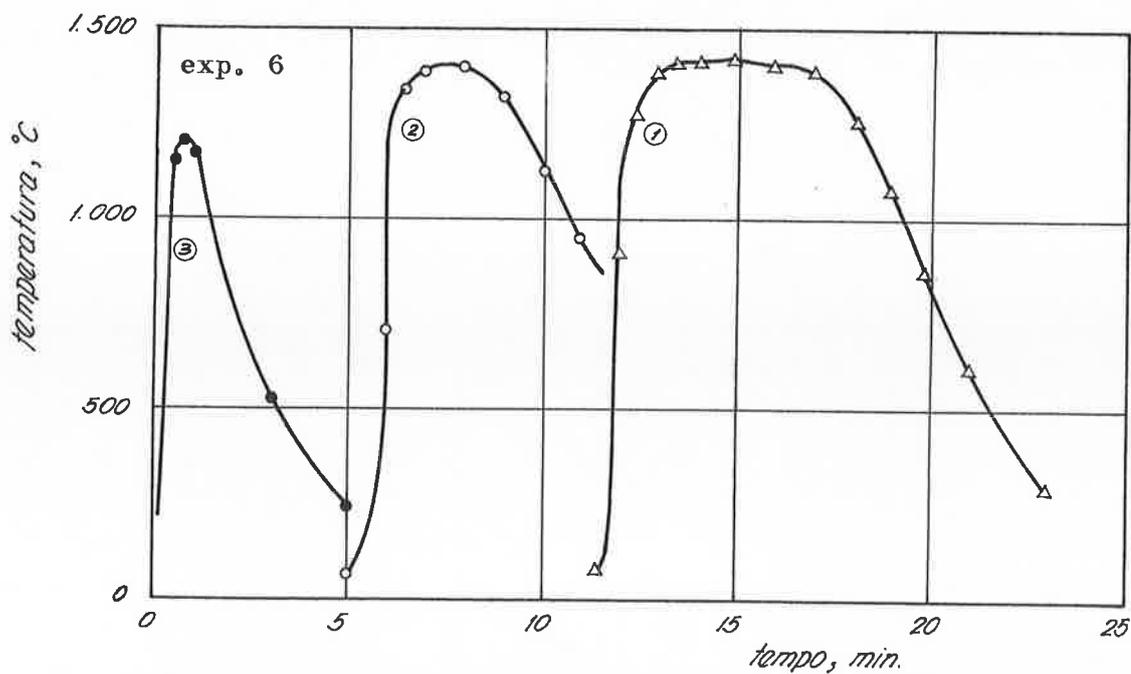


Fig. 50 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 5,1% de carvão metalúrgico (CM), 4,5% de umidade, minério M e 20% de finos de retôrno. Posições dos termopares: 1 - na interface carga-camada suporte; 2 - a 140 mm da primeira e 3 - a 280 mm da primeira.

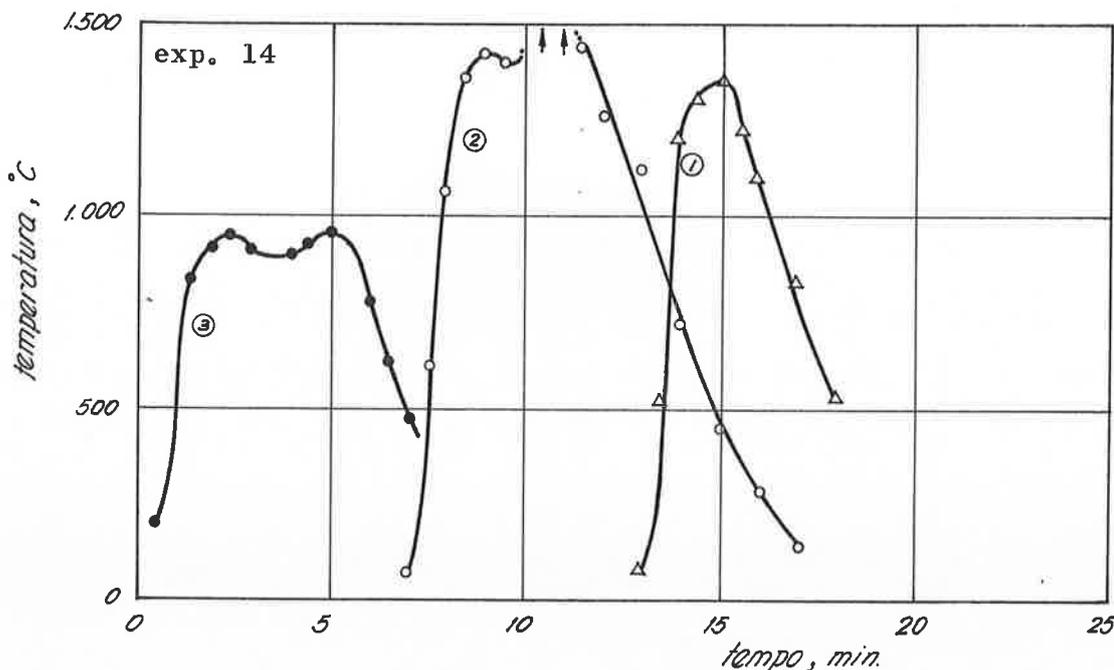


Fig. 51 - Temperaturas obtidas em função do tempo no ensaio de sinterização com 7,0% de carvão metalúrgico (CMI), 4,0% de umidade, minério M e 20% de finos de retôrn. Posições dos termopares: 1 - na interface carga-camada suporte; 2 - a 140 mm da primeira e 3 - a 280 mm da primeira.

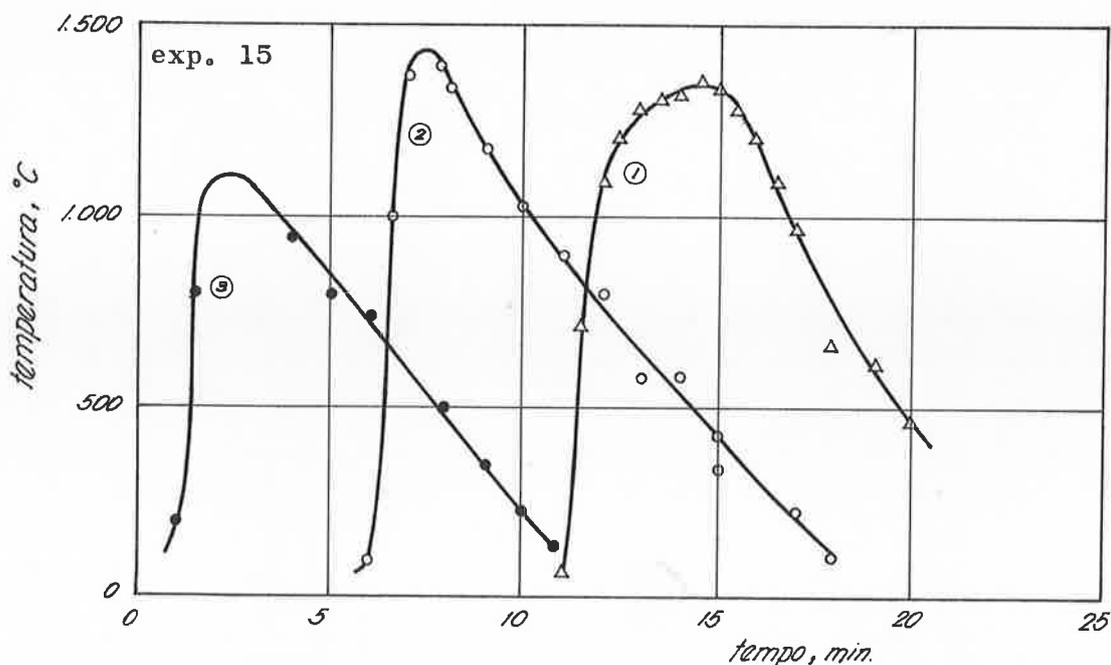


Fig. 52 - Temperaturas obtidas em função do tempo de ensaio de sinterização com 7,0% de carvão metalúrgico (CMI), 4,5% de umidade, minério M e 20% de finos de retôrn. Posições dos termopares: 1 - na interface carga-camada suporte; 2 - a 140 mm da primeira e 3 - 280 mm da primeira.