

INVESTIGAÇÃO SOBRE O COMPORTAMENTO DO LEITO DE
SINTERIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DURANTE
O CHOQUE TÉRMICO

(1)

Eduardo Alberto da Costa Pereira (2)
Eric Poot (3)

R E S U M O

Pesquisadores da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e do Centre de Recherches Metallurgiques (CRM) conceberam e empregaram um ensaio que mede variações da permeabilidade específica de uma camada de mistura a sinterizar de 20mm, durante o choque térmico que ocorre no processo de sinterização.

Os ensaios realizados indicaram que a sensibilidade ao choque térmico das misturas a sinterizar é função da mineralogia dos minérios, da umidade e da adição de cal à mistura.

-
- (1) Contribuição ao Seminário COMIN-COMAP - Porto Alegre; Setembro de 1987.
 - (2) Membro da ABM, Engenheiro Metalúrgico, M.Eng.Met., Pesquisador do Centro de Pesquisas da CSN.
 - (3) Geólogo, Pesquisador do Centre de Recherches Metallurgiques, Bélgica.

1.0

INTRODUÇÃO

As opiniões dos pesquisadores se dividem sobre os fenômenos relacionados à secagem dos grânulos da mistura a sinterizar, quando submetidos ao choque térmico.

Os fenômenos relacionados ao choque térmico no processo de sinterização podem ser associados à diminuição do índice de vazios da camada e ao aumento da viscosidade do gás que a percola, mensuráveis indiretamente, como gradientes de pressão e temperatura, através da camada.

Visando a realizar tais medidas, foi concebido um teste que, empregado em diversas misturas a sinterizar, trouxe luz a respeito de certos fenômenos relacionados ao choque térmico, quantificando os.

As experiências foram realizadas numa cuba cilíndrica de 12cm de diâmetro e 40cm de altura, onde sondas e termopares foram introduzidos nos níveis de 20 e 22 centímetros abaixo da superfície superior. Os dados de temperatura, perda de pressão, vazão e tempo foram tratados de modo que permitiram uma descrição da variação da permeabilidade específica dessa camada de 2cm durante o choque térmico.

2.0

REVISÃO DA LITERATURA

SCHLUTER e BITSIANES (1) observaram a estrutura macroscópica de leitos de sinterização em que o processo foi interrompido. Concluíram que a carga sob a zona de sinterização apresentava-se inalterada, preservando estrutura de grânulos original.

Visando a desenvolver uma simulação do processo de sinterização, CUMMING et al (2) consideraram que o diâmetro dos grânulos varia somente quando ocorre fusão, assegurando que determinaram experimentalmente que a secagem tem um efeito negligível na variação da fração de vazios do leito. Por outro lado, estabeleceram que a condensação de água reduz a fração de vazios do leito.

Anteriormente, WILD e DIXON (3) já haviam estudado os gradientes de pressão e umidade a longo de leitos de sinterização e concluí-

ram que um pequeno aumento na resistência à vazão de ar, na parte inferior do leito, poderia ser creditada à condensação da água. Concluíram ainda que a água condensada poderia ser absorvida pelos grânulos ou permanecer nos vazios, a primeira alternativa sendo menos evidente quando a umidade inicial da mistura for mais elevada.

Os grânulos da mistura a sinterizar foram descritos por RANKIN et al (4) como constituídos por grãos aderentes de menor tamanho, formando camadas em torno de um núcleo, constituído por grão de maior tamanho. De modo geral, duas camadas foram evidenciadas: primeira mente, partículas mais finas recobrem o núcleo, arredondando-o por fechamento de poros externos e reentrâncias; extremamente, partículas maiores aderem ao grânulo, imersas em matriz constituída por partículas mais finas, similares às da camada interna.

ROLLER e FIRTH (5) consideraram que as partículas aderentes de maior tamanho teriam uma parte considerável de suas superfícies expostas e quando ar fosse forçado através do leito de sinterização, uma forte tensão nelas seria aplicada. Se não fossem bem fixadas, essas partículas poderiam mover-se e bloquear parcialmente os orifícios no leito, através dos quais o ar passa.

WYNNICKYJ e BATTERHAM (6) reportaram a possibilidade da crepitação de grãos de minério de ferro como causa de perda de permeabilidade no leito, sem referirem-se a qualquer experimento onde tal fato tivesse sido observado.

CALLENDER (7) estudou a permeabilidade do leito durante o processo, detectando as causas de resistência à vazão do ar medindo depressões em vários níveis de camadas de misturas a sinterizar com minérios australianos. Relatou que em todos os casos estudados a maior variação de perda de carga ocorreu através da zona seca bem à frente da zona de sinterização. O diferencial de pressão através dessa zona era suficiente para sugerir que a maior resistência ao escoamento gasoso durante a sinterização, sem adições ou umidade excessiva, deveria ocorrer na zona de "secagem rápida". O autor também achou que a taxa de variação de pressão não era tão forte para misturas contendo bentonita ou cal, indicando que tais adições poderiam ser meios efetivos de redução da resistência da zo-

na de "secagem rápida". Finalmente, Callender sugeriu que durante o choque térmico, a ligação entre as partículas constituintes dos grânulos poderia ser perdida ou diminuída, liberando finos que reduziriam a permeabilidade do leito.

A figura 1 resume os mecanismos principais de perda de permeabilidade do leito de sinterização, de acordo com as referências citadas acima.

3.0 TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 AMOSTRAS EMPREGADAS

As amostras de minério empregadas foram provenientes de um grande número de jazidas (ver tabela I). Vieram de todos os continentes, apresentando diferentes composições mineralógicas e distribuições granulométricas.

3.2 PROCEDIMENTO EMPREGADOS

Adotou-se uma cuba cilíndrica de 120mm de diâmetro interno e 400mm de altura. Foram feitos furos redondos a 200 e 220mm da superfície superior da cuba, visando a introdução das sondas de pressão e temperatura no leito.

Em todos os testes, 10 kg de mistura foram preparados. Uma amostra de 300g era tomada para a determinação de umidade e o peso carregado era anotado para o cálculo de densidade (ver tabela II).

Medidas visando a determinação de permeabilidade a frio do leito eram feitas logo após a introdução das sondas de acordo com o modelo proposto por VOICE et al (8) e a primeira era utilizada para conferir os resultados.

A ignição era efetuada a um depressão constante de 500mm H₂O, com tempo de ignição de 1 minuto e carga térmica de 60MJ/m²min., com um excesso de ar calculado em 50%. Um termopar na superfície do leito indicava temperaturas de ignição em torno de 1200°C.

Após a ignição, a sucção aumentava imediatamente para 1500mm H₂O. Quando a frente de queima chegava a 20cm abaixo da superfície, a

temperatura naquele ponto elevava-se de cerca de 550°C para mais de 1200°C. A velocidade média da frente de queima entre 20 e 22cm da superfície situou-se em torno de 25mm/min (ver tabela II).

O fim de cada teste era determinado pela temperatura máxima das fumaças, normalmente de 9 a 12 minutos após o término da ignição (ver tabela II).

3.3 ANÁLISE DO PROCESSO

Nas investigações, a cuba foi empregada exclusivamente na análise do comportamento de uma camada de mistura a sinterizar durante o choque térmico. Conforme mencionado anteriormente, a forte variação de perda de pressão que ocorre durante o choque térmico deve-se ao aumento da viscosidade do ar e à perda de permeabilidade da camada.

A viscosidade do ar aumenta com a temperatura. A equação de SUTHERLAND é a mais conhecida de uma variedade de equações que relacionam a viscosidade do ar à sua temperatura. Devido à não-linearidade dessa relação, assim como do gradiente térmico no interior da camada de 20mm durante o choque térmico, um método de cálculo foi proposto; de modo a determinar tão precisamente quanto possível a evolução da viscosidade do ar dentro da camada durante o choque térmico.

Da diferença entre a perda de pressão total e a perda de pressão estimada como devida ao aumento da viscosidade do ar, foi calculada a variação da permeabilidade da camada causada pelo choque térmico.

Primeiramente, temperatura, perda de pressão e vazão foram registradas a cada seis segundos. Os dados iniciais referem-se ao momento em que a temperatura no nível de 20cm começava a elevar-se devido ao choque térmico. O fim das medições foi estabelecido em função da velocidade da frente de queima e, para a maior parte das experiências, corresponde a 48 segundos (velocidade de frente de queima de 25mm/min.).

A cada seis segundos foram projetados para o interior da camada os dados medidos anteriormente, no nível de 20cm. A figura 2 ilustra as estimativas de gradientes de temperatura para algumas experiências, no momento de mínima permeabilidade estimada para a camada.

Um índice de variação de permeabilidade específica da camada, chamado Sensibilidade ao Choque Térmico (SCT), foi proposto e calculado para todos os ensaios.

3.4 ENSAIOS REALIZADOS

3.4.1 MISTURAS SIMPLES

As misturas simples foram preparadas a partir de amostras individuais de minérios, identificadas de acordo com a Tabela I e cujos resultados dos ensaios são apresentados nas onze primeiras linhas das tabelas II e III.

Os valores de permeabilidade a frio variaram de 34,7(MWR) a 59,2Nm³/m²/min (MNM). Já a permeabilidade a quente, quando do momento de SCT máximo na camada 20-22cm, apresentou resultados na faixa de 23,4 (MWR) a 43,7 Nm³/m²/min (MNM). As relações entre permeabilidade a quente e permeabilidade a frio foram de 62(ROR) a 81% (MNM).

A variação máxima de perda de carga na camada em estudo esteve na faixa de 102 (MEN) a 370% (ROR). Já a parcela de variação de perda de carga estimada como devida à perda de permeabilidade da camada em estudo encontrou-se na faixa de 1 (MBR) a 123% (ROR).

A sensibilidade ao choque térmico da camada em estudo, medidas como o valor máximo de SCT, esteve entre 1 (MBR) e 40 (ROR).

3.4.2 MISTURAS BINÁRIAS

As misturas binárias foram produzidas a partir de grãos da amostra de minério ALG, na granulometria de 1 a 5mm (60%) e de grãos da amostra de minério ROR, na granulometria abaixo de 0,5mm (40%).

Foram realizados ensaios com as finalidades de se levantar as influências da umidade e da adição de cal na mistura a sinterizar no comportamento da camada em estudo, durante o choque térmico.

a) INFLUÊNCIA DA UMIDADE

A figura 3 mostra a evolução da sensibilidade ao choque térmico. Os valores máximos de SCT foram respectivamente 25, 16 e 9, para os valores crescentes de umidade. Todas as misturas tiveram adição de cal de 2%. Os dados relativos aos testes encontram-se nas tabelas II e III, ensaios 12 e 14.

b) INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CAL

Duas misturas com 5,3% de umidade foram testadas. A mistura 5A1 não teve adição e a mistura 6C1 teve adição de 2% de cal. Os dados relativos aos testes encontram-se nas tabelas II e III, ensaios 15 e 16.

De acordo com a figura 4, os valores máximos de SCT foram 30 para a mistura sem cal e 16 para a mistura com 2% de adição de cal.

4.0

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A perda de permeabilidade da camada em estudo parece estar em parte associada à crepitação dos grãos de minérios de ferro. Tal fenômeno possivelmente é devido à presença de goethita. Grãos de minérios de ferro hematíticos podem apresentar pequenas inclusões de goethita em seus planos de estratificação e, de acordo com AZEVEDO e CARDOSO (9), elas causam a explosão dos grãos, a temperaturas que dependem dos tamanhos dessas inclusões e dos grãos. NODA et al (10) estudaram 17 amostras de minérios de ferro empregados na siderurgia japonesa e acharam goethita em 15 delas, com teores variando de 4 a 72%, apresentando uma média de 26% de goethita. Tais resultados são comparáveis aos obtidos neste estudo (ver tabela I).

Ao estudar a crepitação de pelotas verdes de minérios de ferro durante a secagem, SCHULZ et al (11) notaram que a goethita era muito sensível ao aquecimento e também observaram que pelotas feitas de grãos finos crepitavam a temperaturas mais baixas.

Tanto a umidade quanto a adição de cal à mistura a sinterizar mostraram-se parâmetros importantes relacionados ao choque térmico que ocorre nos leitos de sinterização. As experiências relatadas neste relatório servem de suporte à idéia de que o controle das forças de coesão, através do acerto do nível de umidade e da adição de cal, reduz a perda de permeabilidade da camada durante o choque térmico.

A permeabilidade a quente não parece depender exclusivamente da permeabilidade a frio e da sensibilidade ao choque térmico da mistura, mas também, da deformação plástica dos grãos hiper-umedecidos, a do tampamento de vazios nas camadas inferiores do leito, da viscosidade média do ar (função do perfil térmico), além das permeabilidades específicas das diversas zonas estabelecidas ao longo do processo.

O valor médio de cerca de 20% de F2 (tabela III) sugere que o controle do perfil térmico seja um recurso importante no esforço de melhoria da permeabilidade a quente.

5.0 CONCLUSÕES

- Foi concebido e empregado um método visando a descrever a variação da permeabilidade específica de uma camada de 20mm de espessura do leito de sinterização, durante o choque térmico;
- O teste empregado mostrou que os leitos de sinterização são sensíveis ao choque térmico, nele perdendo uma parcela de suas permeabilidades específicas;
- Dados relativos ao nível entre 20 e 22cm abaixo da superfície do leito indicaram uma perda média de cerca de 20% da permeabilidade específica da camada em estudo, chegando a 40% no caso de uma amostra de minério goethítico denso;
- A perda de permeabilidade específica da camada representou em média apenas cerca de 20% da variação total da perda de carga na camada em estudo. O controle do perfil térmico fica portanto evidenciado como importante na melhoria da permeabilidade a quente.

- O nível de umidade e a adição de cal mostraram-se como fatores importantes no controle da variação da permeabilidade específica da camada em estudo durante o choque térmico.

6.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) SCHLUTER R. and BITSIANES G.,
"Combustion Zone of Iron Ore Sintering";
in: Agglomeration, Ed. Knepper W.A., Interscience, 1962
(pp. 585-636).
- (2) CUMMING M. J. et al.,
"Modelling and Simulation of Iron Ores Sintering".
in: 4th Int. Symp. on Agg., Toronto, ed ISC/AIME,
1985
(pp. 763-776)
- (3) WILD R. and DIXON K.G.,
"Pressure and Water Gradients Through a Sinter Bed",
in: Agglomeration, Ed. Knepper, W A Interscience,
1962,
(pp. 565-583)
- (4) RANKIN W.J. et al.,
"Quasi Particle Formation and the Granulation of the
Iron Ores Sinter Feeds".
in: Proc. Joint Symp. ISIJ and AUS IMM, Tokyo, Oct.
1983
(pp. 13-28)
- (5) ROLLER P.W. and FIRTH B.A.,
"Granulation of Iron Ore Sinter Feeds",
in: BHP Tech. Bull., 25 (1), 1981
(pp. 79-84)

- (6) WINNYCKYJ J. R. and BATTERHAM R.J.,
"Iron Ore Sintering and Pellet Induration Process"
in: 4th Int. Symp. on Agg., Toronto, ed ISC/AIME,
1985
(pp. 956-994)
- (7) CALLENDER W.,
"Studies in the Sintering Permeability and Pellet
Strength Australian Hematite Ores"
in: Symposium on Iron and Steel Industry in India,
1959
(pp. 114-123)
- (8) VOICE E.W. et al.,
"The Permeability of Sinter Beds",
in: JISI, June 1953
(pp. 136-139)
- (9) AZEVEDO A.L.T. and CARDOSO M.B.,
"Crepitação de Minérios de Ferro-Aplicação da Mecâ-
nica da Fratura",
in: Metalurgia-ABM, vol. 38, n 293, Abr 1982
(pp. 203-208)
- (10) NODA H. et al.,
"Assimilative Characteristics of Iron Ores and Their
Influence on Sinter Qualities".
in: Transactions ISIJ, vol. 25, 1985
(pp. 1103-1110)
- (11) SHULZ N.F. et al.,
"Decrepitation of Balls During Pelletization of Iron
Ore"
in: Transactions AIME, Sept. 1966
(pp. 251-255)

TABELA I - Mineralogia das amostras de minério de ferro empregadas na investigação.

Nº	MIM.	ANÁLISE MINERALÓGICA				CLASSIFICAÇÃO
		H	H	Goe	Gg	
1	ALG	59,9	1,7	24,9	13,5	H especular com cementação de Goe
2	CAR	-	-	-	-	H especular e granular com cementação de Goe
3	GOA	32,9	5,7	50,0	11,4	H granular com pequena quantidade do tipo especular, cementação de Goe e pequena presença de M pura
4	MBR	95,9	2,2	1,6	0,3	H especular muito pura
5	MEN	1,3	0,4	92,4*	5,9	Esponja de Goe porosa
6	MNM	70,8	0,0	16,6	12,6	H granular com teor médio de Goe
7	MWR	84,1	2,3	0,8	12,8	H densa
8	ORN	54,4	1,9	32,8	10,9	H granular e especular com cementação de Goe
9	QUE	15,2	1,2	50,4*	8,4	H esponja, Goe e Siderita
10	RDR	3,0	0,0	93,9*	3,1	Goe compacta
11	TZD	87,6	1,1	1,0	10,3	H granular e especular

LISTA DE SÍMBOLOS:

H	=	Hematita
M	=	Magnetita
Goe	=	Goethita
(*)	=	incluindo lepidocrocita
Gg	=	Ganga

TABELA II - Dados relativos aos ensaios.

N	MIN	H	d	PF	PQ	F1	VFQ
1	ALG	6,3	1,86	48,6	31,9	66	22
2	CAR	6,0	1,63	50,0	36,7	73	31
3	GOA	6,3	1,66	52,4	36,1	69	29
4	MBR	5,7	1,97	47,4	38,2	81	27
5	MEN	6,7	1,76	43,9	30,8	70	29
6	MNM	6,3	1,71	59,2	43,7	74	24
7	MWR	6,7	1,71	34,7	23,4	67	21
8	ORN	6,7	1,72	51,9	35,3	68	24
9	OUE	7,3	1,64	52,1	35,0	67	21
10	ROR	6,7	1,61	50,9	31,8	62	27
11	TZD	6,3	1,89	49,2	32,6	66	27
12	5C1	4,7	1,67	35,8	23,5	66	20
13	6C1	5,3	1,72	43,0	30,1	70	26
14	7C1	6,7	1,63	52,2	35,2	67	25
15	5SC	4,7	1,85	27,6	14,5	53	15
16	5AC	4,7	1,86	27,1	19,3	71	20
\bar{x}	-	6,1	1,87	45,4	31,3	68	24

LISTA DE SÍMBOLOS:

- MIN : Minério ou mistura binária de minérios na carga
H : Umidade da mistura (%)
d : Densidade a granel da carga, base seca (g/cm^3)
PF : Permeabilidade a Frio, como uma medida da vazão de ar através do leito, antes da ignição, para uma depressão de 1500mm M_2O ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min.}$).
PQ : Permeabilidade a Quente, como uma medida da vazão de ar através do leito, no momento de SCT máximo ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min.}$).
F1 : $(\text{PQ}/\text{PF}) \times 100$
VFQ : Velocidade da Frente de Queima na camada estudada ($\text{mm}/\text{min.}$)

TABELA III - Parâmetros empregados para descrever a camada estudada durante o choque térmico.

n	MIN	VMPC	VPCP	F2	SCT	TLS	tc
1	ALC	170	30	18	16	1062	36
2	CAR	188	37	20	17	1110	30
3	GOA	272	73	27	28	1050	24
4	MBR	171	1	1	1	450	30
5	MEN	102	49	47	22	1140	36
6	MNM	187	5	3	3	1380	48
7	MWR	108	28	26	18	600	42
8	ORN	207	25	12	14	1050	36
9	OUE	333	63	19	27	1350	48
10	ROR	370	123	33	40	1260	36
11	TZD	141	20	14	1	360	24
12	5C1	191	44	23	25	1110	30
13	6C1	152	28	18	16	1110	36
14	7C1	89	16	18	9	900	30
15	5SC	154	66	43	30	672	36
16	5AC	194	31	16	17	1040	39
\bar{x}	-	189	40	21	18	980	36

LISTA DE SÍMBOLOS:

- n, MIN : Ver tabela II
- VMPC : Variação Máxima da Perda de Carga, na camada em estudo (%)
- VPCP : Parcela da Variação da Perda de Carga, devida à perda de permeabilidade, na camada estudada, no momento de máximo SCT.
- F2 : $(VPCP/VMPC) \times 100$
- SCT : Sensibilidade ao choque térmico da camada, (valor máximo) medida como uma variação da sua permeabilidade específica.
- TLS : Temperatura no lado superior da camada de 20mm, no momento de SCT máximo (°C)
- tc : Tempo de duração do choque térmico (s)

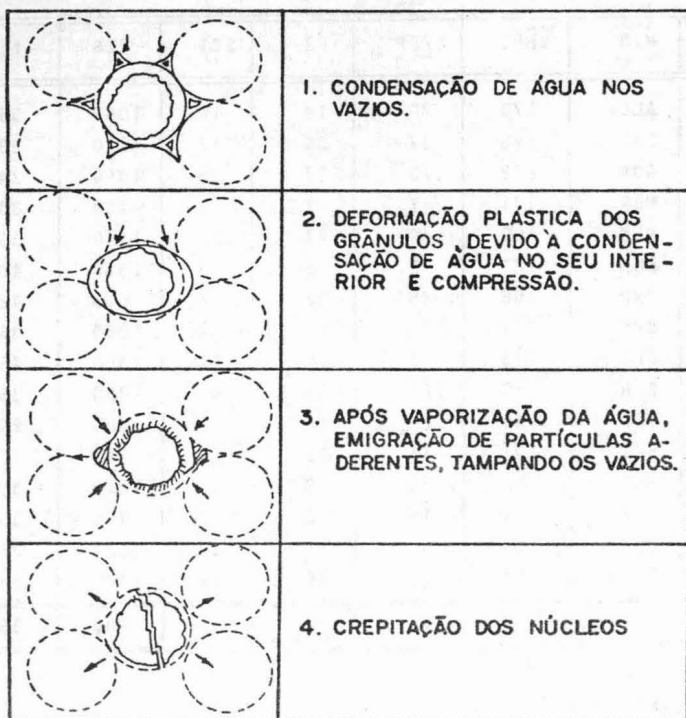


FIG. 1 — MECANISMOS CITADOS NA LITERATURA COMO RESPONSÁVEIS PELA PERDA DE PERMEABILIDADE DO LEITO DE SINTERIZAÇÃO.

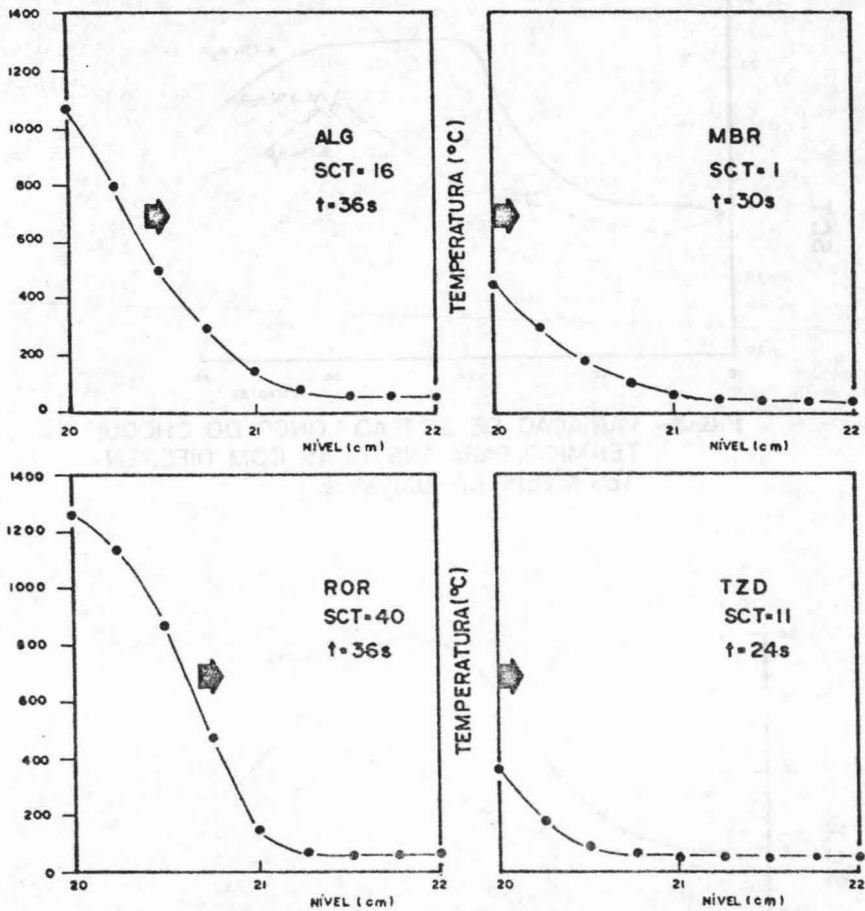


FIG. 2 - GRADIENTES TÉRMICOS ESTIMADOS PARA O INTERIOR DA CAMADA ESTUDADA, NO MOMENTO DE S CT MÁXIMO, PARA ALGUMAS AMOSTRAS DE MINÉRIO.

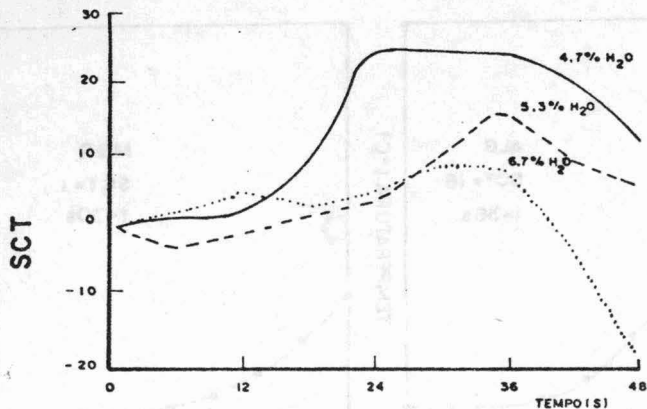


FIG. 3- VARIÇÃO DE SCT AO LONGO DO CHOQUE TÉRMICO, PARA MISTURAS COM DIFERENTES NÍVEIS DE UMIDADE.

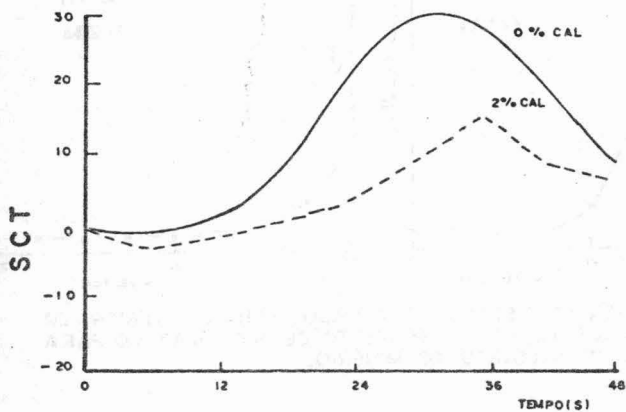


FIG. 4 - VARIÇÃO DE SCT AO LONGO DO CHOQUE TÉRMICO, PARA MISTURAS COM E SEM ADIÇÃO DE CAL.