



# DESENVOLVIMENTO DE MISTURAS DE SINTERIZAÇÃO DE ELEVADO DESEMPENHO COM ÊNFASE NA ESCOLHA DO CALCÁRIO E DO COMBUSTÍVEL SÓLIDO<sup>1</sup>

*Magno Rodrigues Ribeiro<sup>2</sup>*

*Hamilton Porto Pimenta<sup>2</sup>*

## Resumo

Em suporte ao projeto de uma nova siderúrgica na Ásia, realizou-se um estudo em sinterização piloto para a definição de uma mistura de sinterização de elevado desempenho. O estudo foi realizado nos laboratórios do Centro de Tecnologia de Ferrosos (CTF) da Vale. Foram avaliadas misturas com diferentes participações de minérios brasileiros e australianos, diferentes tipos de calcário calcítico e diferentes proporções de coque e antracito. A mistura de mais alto desempenho foi a de maior participação de minérios da Vale, calcário do tipo marinho e um combustível sólido constituído por 35% de antracito e 65% de coque. Os resultados do estudo foram apresentados ao cliente e servirão de base para a definição final da mistura a ser consumida na nova planta de sinterização.

**Palavras-chave:** Sinterização; Calcário calcítico; Combustível; Carga metálica.

## DEVELOPMENT OF SINTERING MIXTURES OF HIGH PERFORMANCE WITH EMPHASIS ON THE CHOICE OF LIMESTONE AND SOLID FUEL

## Abstract

In support of a project for a new steel plant in Asia, a pilot study on sintering was carried out in order to define a mixture of high performance on sintering. This study was performed in Vale's Ferrous Technology Center (CTF) laboratories. Mixtures evaluated included Brazilian and Australian ores, different types of limestone, and different proportions of coke and anthracite. The mixture of highest performance was that with more Vale's iron ores, reef limestone and a solid fuel consisting of 35% anthracite and 65% of coke. The results were presented to the client, providing a basis for the final definition of the mixture to be consumed in the new sintering plant.

**Keywords:** sintering, reef limestone, fuel, metallic burden.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Vale, Departamento de Marketing, Pesquisa e Desenvolvimento, Centro de Tecnologia de Ferrosos.*

## 1 INTRODUÇÃO

A Vale S.A. firmou um Acordo de Cooperação Técnica (sigla em inglês: TCA) com um cliente que está desenvolvendo um projeto de usina siderúrgica integrada na Ásia. Seguindo o previsto nesse acordo, foi desenvolvido um estudo de sinterização em escala piloto para avaliar as misturas de minério de ferro, fundentes e combustíveis sólidos a serem utilizados na futura planta industrial de sinterização. O objetivo foi fornecer informações para suportar as escolhas de matérias-primas para a sinterização.

Este trabalho apresenta a avaliação de desempenho de misturas de sinterização com dois níveis de participação de minérios brasileiros e australianos, dois tipos de calcário calcítico e três diferentes proporções de coque e antracito. O estudo foi realizado nos laboratórios do Centro de Tecnologia de Ferrosos (CTF) da Vale S.A, localizado no município de Nova Lima, Minas Gerais, Brasil.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A composição química dos minérios e insumos utilizados no estudo está listada na Tabela 1. Foram utilizados seis minérios australianos (A a F) e dois minérios brasileiros (G, H).

**Tabela 1** - Composição química de minérios e insumos (%)

	Fe <sub>T</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P	Mn	PPC
A	62,55	3,75	2,15	0,03	0,08	0,089	0,062	3,55
B	57,97	5,00	1,38	0,04	0,09	0,055	0,025	10,24
C	61,80	3,44	1,95	0,04	0,07	0,088	0,119	5,14
D	61,57	3,24	1,88	0,01	0,08	0,078	0,074	6,19
E	59,71	3,12	1,34	0,22	0,08	0,050	0,228	8,77
F	62,41	2,86	1,24	0,01	0,05	0,055	0,164	6,35
G	64,83	4,52	0,70	0,01	0,03	0,040	0,098	1,47
H	66,15	1,32	1,13	0,01	0,05	0,025	0,645	1,68
Quartzito	0,00	95,00	1,94	0,00	0,00	0,002	0,010	0,30
Calcário marinho	0,10	0,10	0,12	53,00	0,29	0,018	0,010	43,65
Calcário mármore	0,20	0,68	0,10	53,60	0,48	0,014	0,056	43,33
Serpentinito	4,47	36,21	1,15	0,54	42,47	0,010	0,091	12,27
Coque	5,53	3,16	0,03	0,12	0,15	0,020	0,320	88,85
Antracito	0,00	10,40	3,85	0,83	0,20	0,036	0,071	81,02

Cada um dos dois tipos de calcário disponíveis foi britado com duas diferentes aberturas no britador, de forma a se obterem duas diferentes distribuições granulométricas. A Tabela 2 mostra as distribuições granulométricas dos minérios e insumos utilizados.

**Tabela 2 - Distribuição granulométrica de minérios e insumos**

Matéria-prima	% acumulado / malha (mm)			
	+ 6,3	+ 1,0	- 1 + 0,15	- 0,15
A	13,8	51,0	16,1	32,8
B	19,0	60,2	21,8	18,1
C	6,6	49,1	20,7	30,2
D	10,7	44,5	20,3	35,2
E	30,3	71,6	13,1	15,3
F	45,2	80,7	8,5	10,8
G	10,2	51,3	20,3	28,4
H	11,4	43,5	27,1	29,4
Quartzito	0,0	0,0	64,3	35,7
Calcário marinho < 3.0 mm	0,0	57,5	32,3	10,2
Calcário marinho < 6.3 mm	0,7	65,6	24,3	10,2
Calcário mármore < 3.0 mm	0,0	61,2	25,5	13,2
Calcário mármore < 6.3 mm	3,4	72,0	20,1	8,0
Serpentinito	0,0	80,9	16,0	3,1
Coque	0,0	58,6	30,0	11,4
Antracito	0,2	62,7	28,8	8,6

O planejamento dos testes de sinterização é mostrado na Tabela 3.

**Tabela 3 – Plano de testes na sinterização piloto**

Número do Teste	Tipo do calcário	Máximo Tamanho do Calcário	Tipo de combustível	Proporção de cada minério (%)							
				A	B	C	D	E	F	G	H
M1	Mármore	3,0 mm	65% coque; 35% antracito	11	13	5	13	16	5	18	19
M2	Mármore	6,3 mm	65% coque; 35% antracito	11	13	5	13	16	5	18	19
M3	Marinho	3,0 mm	65% coque; 35% antracito	11	13	5	13	16	5	18	19
M4	Marinho	6,3 mm	65% coque; 35% antracito	11	13	5	13	16	5	18	19
M5	Mármore	3,0 mm	80% coque; 20% antracito	11	13	5	13	16	5	18	19
M6	Mármore	3,0 mm	100% coque	11	13	5	13	16	5	18	19
M7	Mármore	3,0 mm	65% coque; 35% antracito	5.5	13	2.5	6.5	7.5	5	30	30
M8	Marinho	6,3 mm	65% coque; 35% antracito	5.5	13	2.5	6.5	7.5	5	30	30

A quantidade de aditivos para cada teste foi calculada através de balanço de massas, de forma a maximizar o teor de ferro do sínter, mantendo constante três valores: basicidade binária ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) igual a 1,6, teor de  $\text{MgO}$  de 1,5% e teor de  $\text{SiO}_2$  de 5,0%. Os teores dos demais elementos foram consequência do balanço de massas. A Tabela 4 mostra as quantidades de aditivos empregadas.

**Tabela 4 - Composição das misturas para os testes (%)**

Total (% massa)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Mistura de minérios	79,4	79,4	79,5	79,5	80,3	79,7	79,2	79,1
Calcário mármore	12,8	12,8	0,0	0,0	12,8	12,7	12,8	0,0
Serpentinito	3,0	3,0	2,8	2,8	3,1	3,0	3,1	2,9
Quartzito	0,2	0,2	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2	0,5
Calcário marinho	0,0	0,0	12,9	12,9	0,0	0,0	0,0	13,0
Coque	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	4,3	3,0	3,0
Antracito	1,6	1,6	1,6	1,5	0,7	0,0	1,6	1,6

Os testes foram realizados de acordo com procedimentos do CTF. Similarmente ao que ocorre na sinterização industrial, o processo em escala piloto segue quatro etapas: (i) produção da mistura a ser sinterizada, (ii) tratamento térmico (queima) da mistura, (iii) desagregação de bolo de sínter e produção de finos de retorno, e (iv) avaliação da qualidade do sínter.

O modelo experimental de sinterização utilizado no CTF é baseado na técnica francesa de simulação, cujas principais características são o balanceamento entre o retorno de sinterização carregado e o gerado, sendo a taxa de combustível sólido ajustada para equilibrar essa taxa de retorno, deixando-se livre o teor de FeO do sínter. A produção de finos de retorno foi realizada de acordo com cálculo de carga específico para cada mistura. Foram utilizados 30% de finos de retorno na mistura total.

A umidade ótima da mistura foi determinada a partir dos resultados dos testes (queimas), partindo-se da umidade 6,0% e aumentando-se esse valor de 0,5% em 0,5%. A desintegração do bolo de sínter foi realizada submetendo-o a 50 rotações a 25rpm num tambor tipo ASTM (914 mm de diâmetro por 417 mm de largura). Adotou-se como procedimento de balanceamento de retorno, o balanço entre os finos gerados e finos alimentados em 100% ± 2%. Para cada queima de umidade ótima é feito um ensaio de tamboramento para avaliar a resistência mecânica do sínter. Escolhe-se como umidade ótima aquela que permite a melhor produtividade utilizando-se o índice de tamboramento como item de verificação.

Cada vez que uma mistura é queimada, obtém-se um resultado. A média de três resultados válidos nas mesmas condições de mistura e processo é o que se chama de ponto, ou resultado de uma determinada condição. A validação de cada uma das três queimas ocorre apenas através da aprovação dos parâmetros calculados conforme as equações a seguir:

$$\text{Peso Carregado (PC): } \left( \frac{PC_{\text{máx.}} - PC_{\text{mín.}}}{PC_{\text{médio}}} \right) \times 100 \leq 2,0\%$$

$$\text{Tempo de sinterização (TS): } \left( \frac{TS_{\text{máx.}} - TS_{\text{mín.}}}{TS_{\text{médio}}} \right) \times 100 \leq 7,0\%$$

$$\text{Balanço de massa: } \left\{ \frac{\left( P_{\text{bolo}} - P_{\text{bedding}} \right) - \left[ \left( PP_{\text{seco}} \times \frac{PC_{\text{úmido}}}{PP_{\text{úmido}}} \right) \times \text{Rend.} \right]}{\left( PP_{\text{seco}} \times \frac{PC_{\text{úmido}}}{PP_{\text{úmido}}} \right) \times \text{Rend.}} \right\} \times 100 \leq 2,0\%$$

$$\text{Balanço de retorno: } \frac{(RTF_{\text{gerado}} - RTF_{\text{carregado}})}{(RTF_{\text{carregado}})} \times 100 \leq 2,0\%$$

onde P = massa (kg);  
 PP = massa preparada (kg);  
 PC = massa carregada (kg);  
 Rend. = rendimento químico (%) = 100% - perda ao fogo da mistura total;  
 RTF = massa de finos gerados ou carregados na sinterização (kg).

Os parâmetros do processo de sinterização utilizados nos testes são apresentados na Tabela 5. Considerou-se como fim do tempo de queima o tempo até o momento em que o gás de exaustão atingiu a temperatura máxima mais dez por cento do tempo decorrido até então.

**Tabela 5** - Parâmetros de processo da sinterização

Parâmetro experimental	Valor adotado
Diâmetro superior da panela [mm]	300
Diâmetro inferior da panela [mm]	270
Altura da panela [mm]	700
Tempo de mistura a seco [min]	2 min
Tempo de mistura a úmido [min]	6 min
Intensidade da ignição [Mcal/min/m <sup>2</sup> ]	20
Temperatura antes da ignição [°C]	1100
Tempo de ignição [s]	90
Tempo do forno sobre a panela após ignição [s]	90
Pressão de sucção na ignição [mmH <sub>2</sub> O]	600
Pressão de sucção na queima e no resfriamento [mmH <sub>2</sub> O]	1600 / 700

### 3 RESULTADOS E COMENTÁRIOS

A Tabela 6 mostra a composição química dos sínteres das diversas condições testadas e a Tabela 7 mostra os resultados de todos os testes. A umidade ótima foi determinada em 7,0% para todas as misturas. O sinter produzido com a mistura M7 apresentou os melhores resultados químicos, físicos e de qualidade metalúrgica. Após saber desses resultados, realizou-se a mistura M8, utilizando os mesmos minérios da mistura M7, mas com o calcário marinho. A mistura M8 apresentou a melhor qualidade física, com baixo consumo de combustível, o que significa que sua produtividade pode ser aumentada em uma operação real. Para efeito de análise dos resultados, os comentários e gráficos serão agrupados nas próximas seções.

**Tabela 6 - Composição química dos sínteres**

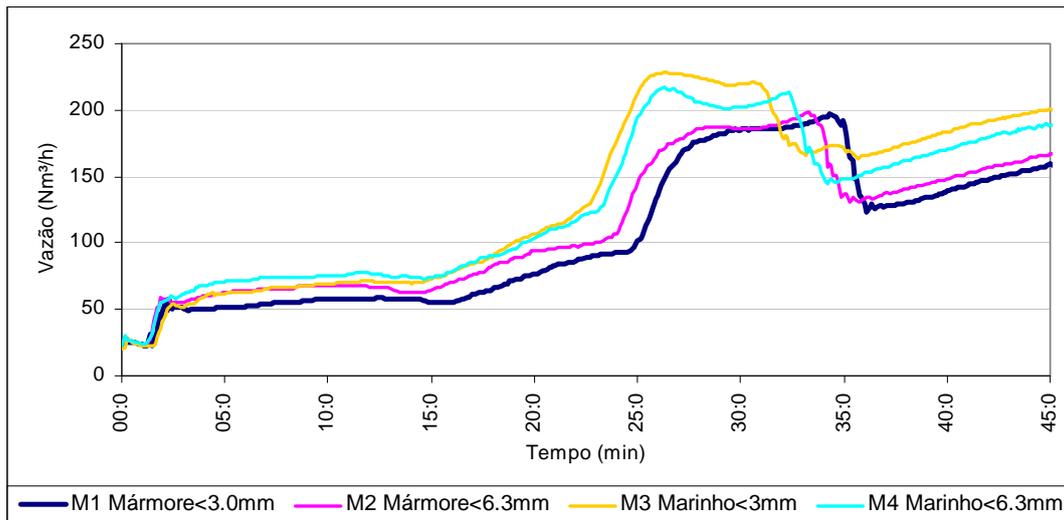
Elemento / Sínter	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P	Mn	B <sub>2</sub>	Slag
<b>M1</b>	57,97	5,03	1,42	8,05	1,50	0,054	0,22	1,60	16,0
<b>M2</b>	57,97	5,04	1,42	8,06	1,50	0,054	0,22	1,60	16,0
<b>M3</b>	57,92	5,00	1,41	8,00	1,50	0,054	0,21	1,60	15,9
<b>M4</b>	57,92	5,00	1,41	8,00	1,50	0,054	0,21	1,60	15,9
<b>M5</b>	58,09	5,00	1,39	8,00	1,50	0,053	0,22	1,60	15,9
<b>M6</b>	58,14	5,00	1,35	8,00	1,50	0,054	0,22	1,60	15,9
<b>M7</b>	58,18	5,00	1,23	8,00	1,50	0,045	0,26	1,60	15,7
<b>M8</b>	58,07	5,00	1,21	8,00	1,50	0,046	0,26	1,60	15,7

**Tabela 7 - Resultados dos testes de sinterização**

Parâmetros de processo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Produtividade (t/m <sup>2</sup> /dia)	29,2	30,5	32,0	30,8	29,6	27,8	27,6	29,4
Coke rate (kg/t. sínter)	60,5	61,4	58,7	58,2	59,3	56,1	59,1	58,8
Tempo de sinterização (min)	35,4	33,9	32,0	33,1	35,6	37,1	38,9	35,5
Resistência mecânica	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Tumbler Index (ISO 3271) [% +6,30 mm]	69,1	66,7	69,1	68,6	68,1	68,1	70,0	71,3
Abrasion Index (ISO 3271) [% - 0,500 mm]	6,2	6,5	4,2	6,4	6,8	6,6	7,1	6,4
Shatter Index (JIS M8711) [% + 9,52 mm]	85,9	82,7	85,7	84,6	84,9	84,8	88,6	89,2
Metallurgical parameters	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
RDI (ISO 4696-2) [% - 2,83mm]	40,0	37,4	40,5	36,9	40,3	38,2	35,0	34,7
Reducibility Index (ISO 7215) [%]	76,4	79,0	72,3	65,9	67,5	73,4	79,9	79,5

### 3.1 Efeito do Tipo de Calcário

Na Figura 1 é possível observar o comportamento das misturas com os diferentes tipos de calcário, observando a vazão ao longo do tempo das misturas M1 a M4. A Mistura M1, que continha calcário de mármore passante em 3,0 mm, apresentou menor vazão e maior tempo de sinterização, em função de sua menor permeabilidade, ocasionando a sua menor produtividade.



**Figura 1** - Vazões de ar ao longo do tempo de sinterização das misturas M1 a M4.

Nas misturas M3 e M4, com calcário marinho, observaram-se aumentos de produtividade de cerca de 5%, com redução de consumo específico de combustível de cerca de 4%, na comparação com o calcário de mármore (misturas M1 e M2) e ainda mantendo a resistência do sinter.

Embora o calcário marinho de tamanho máximo de 3,0 mm tenha apresentado melhor produtividade e maior vazão, aconteceram problemas de estabilidade do processo (tendo sido necessário repetir alguns testes, devido à dificuldade de encontrar o equilíbrio entre os finos carregados e os finos gerados). Por isso, o calcário marinho com tamanho máximo de 6,3mm foi escolhido para ser utilizado na mistura M8. Comparando M7 e M8, o calcário marinho causou novamente um aumento na produtividade, de 6,5% nesse caso.

Para o calcário de mármore, os melhores resultados foram obtidos para a granulometria preparada em < 3,0 mm (mistura M1), pois promoveu uma melhor qualidade física do sinter com menor consumo de coque, embora a sua permeabilidade tenha sido um pouco pior do que a da mistura M2. O calcário de mármore preparado abaixo de 3,0 milímetros foi escolhido para ser utilizado nas misturas M5 e M6, que tinham como objetivo comparar o tipo de combustível.

### 3.2. Efeito do Tipo de Combustível

A única diferença entre as misturas M1 (65% coque e 35% antracito), M5 (80% coque e 20% antracito) e M6 (100% coque) foi a constituição do mistura de combustíveis sólidos. Comparando-se essas três misturas, a mistura M6 apresentou os piores resultados, com exceção do consumo de combustível. As misturas M1 e M5 apresentaram valores semelhantes em termos de produtividade, mas M1 apresentou a melhor qualidade física e metalúrgica. Em termos de permeabilidade, M1 apresentou melhores resultados (Figura 2). Assim, o melhor combustível sólido foi o obtido pela combinação de 65% de coque com 35% de antracito.

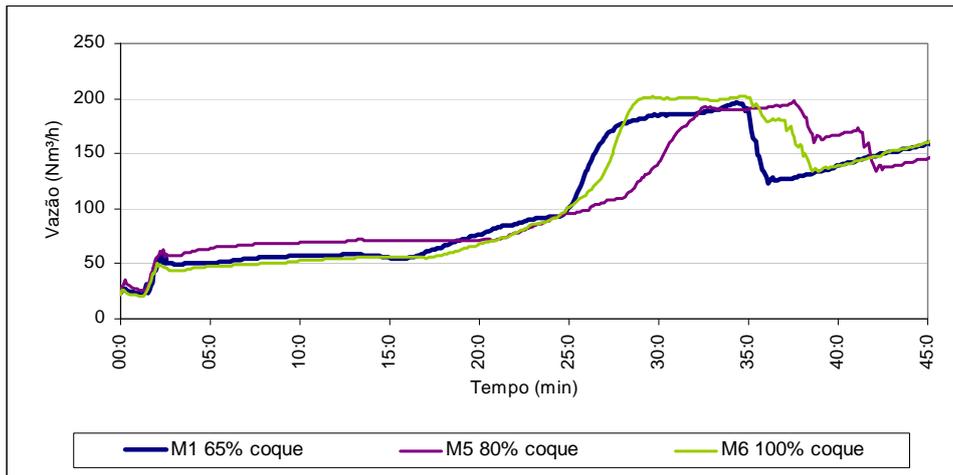


Figura 2 - Vazão ao longo do tempo de misturas M1, M5 e M6.

### 3.3 Produtividade

A Figura 3 mostra uma comparação entre as produtividades obtidas na sinterização das misturas estudadas. As produtividades ficaram em um intervalo de 27,6 t/m<sup>2</sup>/dia a 32,0 t/m<sup>2</sup>/dia.

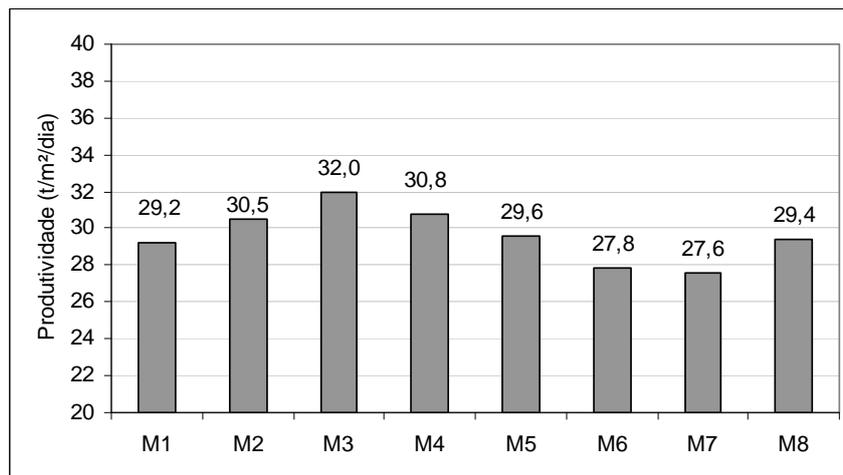


Figura 3 - Produtividade na sinterização.

A Figura 4 mostra a vazão de ar ao longo do tempo das misturas M1, M7 e M8. A Mistura M7, que tinha 60% de minério de ferro da Vale, demonstrou permeabilidade inferior, mas quando o tipo de calcário foi mudado de mármore para marinho, a permeabilidade tornou-se a melhor (M8). Nesse caso, o efeito de calcário foi mais importante do que o efeito do minério de ferro.

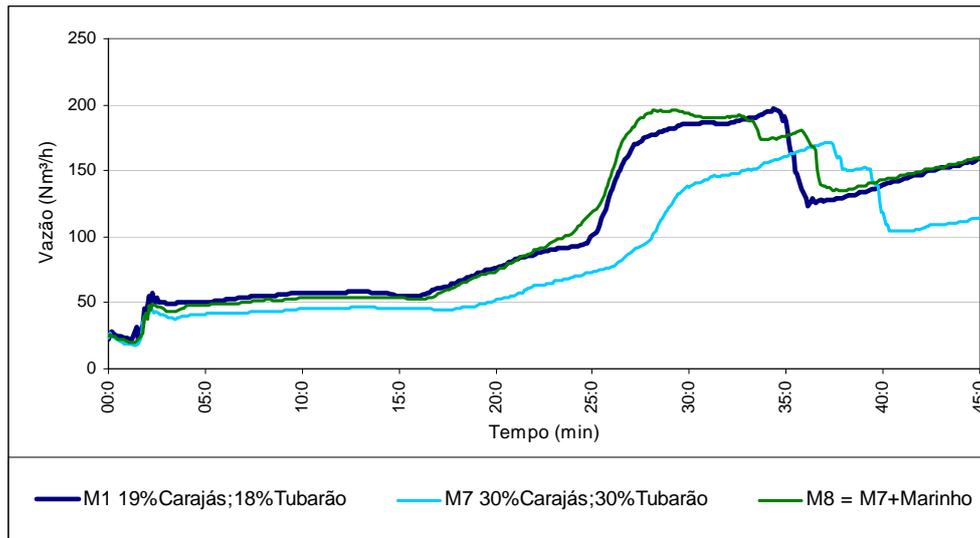


Figura 4 - Vazão ao longo da sinterização das misturas M1, M7 e M8.

### 3.4 Consumo Específico de Combustível

Muitos fatores podem afetar o consumo de combustível sólido, por exemplo, a permeabilidade da carga, umidade, tamanho das partículas de coque, reatividade e grau de hidratação dos minerais.

A Figura 5 mostra uma comparação dos consumos específicos de combustível sólido das misturas avaliadas. O consumo de combustível da mistura M6 foi menor do que o das outras misturas em função do tipo de combustível: 100% de coque ao invés da combinação de coque mais antracito dos outros.

Para as misturas M7 e M8 o baixo consumo de coque é atribuído ao menor valor de perda ao fogo apresentado pelos minerais da mistura. O menor consumo de coque apresentado pelas misturas M3 e M4 é atribuído à melhor permeabilidade promovida pelo calcário marinho.

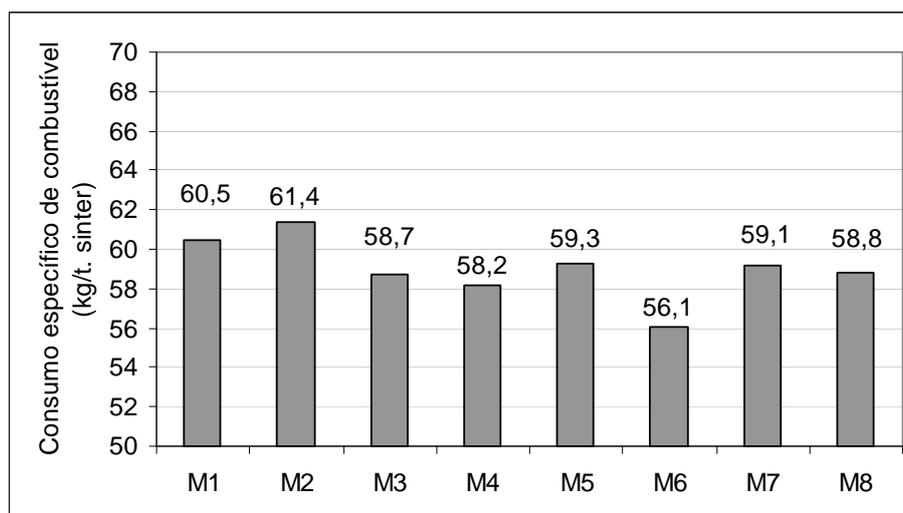


Figura 5 - Consumo específico de combustível das misturas avaliadas.

### 3.5. Resistência Mecânica do Sínter

A Figura 6 mostra os valores de *Tumbler Index* e *Shatter Index* dos sínteres avaliados. Observa-se que as misturas M7 e M8 mostraram os melhores resultados devido à menor quantidade de minerais hidratados<sup>(1)</sup> (ver valores de PPC na Tabela 1) e ao menor teor de  $Al_2O_3$ .

Comparando-se as misturas M4 e M8 (com a mesma fonte de calcário, calcário marinho) há uma diferença de 5% nos valores de *Shatter Index*. Isto significa que, em uma planta de sinterização real, fornecendo sinter para o alto-forno, mais finos seriam gerados pela mistura M4 do que por M8, reduzindo o rendimento de sinter.

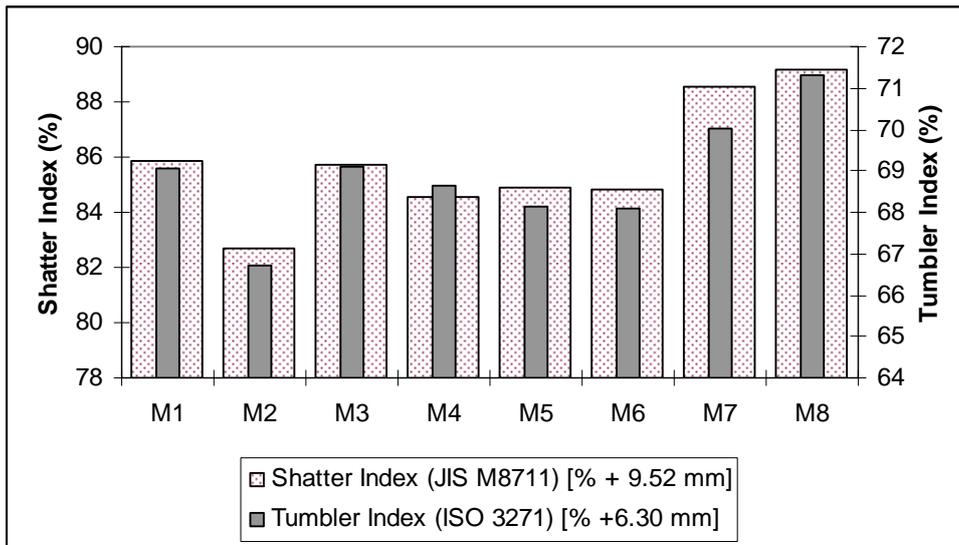


Figura 6 - *Shatter Index* e *Tumbler Index* das misturas avaliadas.

### 3.6 Propriedades Metalúrgicas dos Sínteres

A Figura 7 mostra os valores de RDI dos sínteres avaliados. Observa-se que as misturas M7 e M8 mostraram os melhores valores de RDI. Atribui-se esse fato ao menor teor de  $Al_2O_3$  das misturas<sup>(2,3)</sup> em função da maior participação de minérios brasileiros.

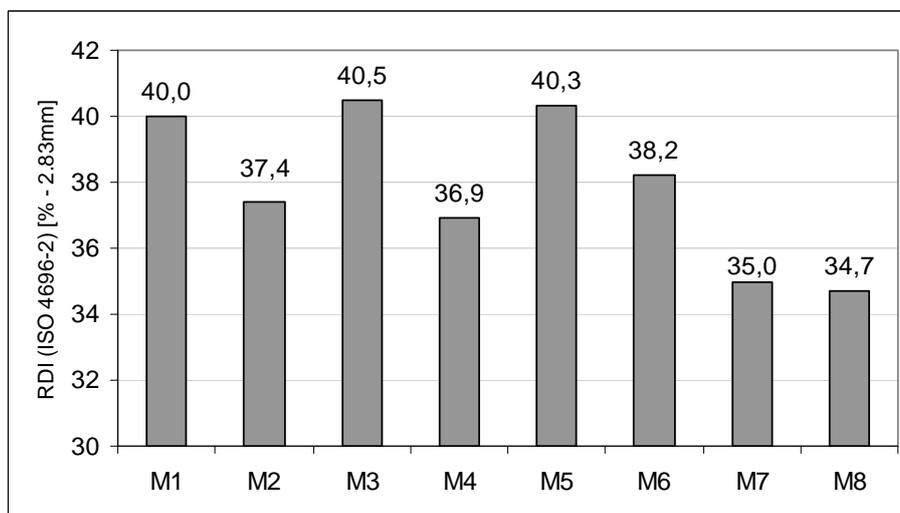


Figura 7 - Valores de RDI dos sínteres avaliados.

A Figura 8 mostra os resultados do grau de redução dos sinteres avaliados. As misturas M7 e M8 apresentaram os melhores valores de redutibilidade, mesmo tendo maior resistência mecânica. Atribui-se esse fato à maior participação do minério H, de elevada micro porosidade, e ao menor teor de  $Al_2O_3$  dessas misturas, na faixa de teor de alumina do sinter menor que 1,5%.<sup>(4)</sup>

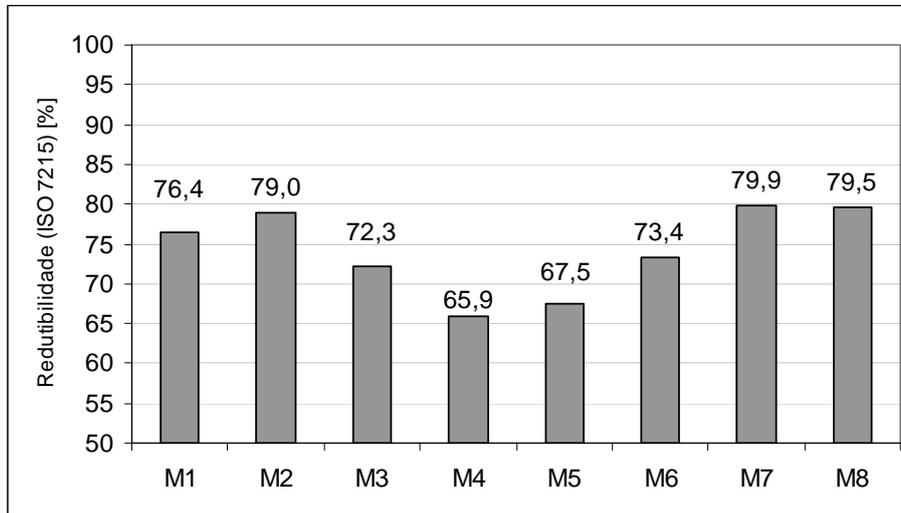


Figura 8 - Redutibilidade dos sinteres avaliados.

#### 4 CONCLUSÕES

A definição adequada do tipo e da distribuição granulométrica do calcário é fundamental para o bom desempenho de misturas de sinterização. Neste estudo, o calcário do tipo marinho apresentou desempenho superior ao do tipo mármore, cujo efeito foi superior à do próprio minério.

Da mesma forma, para se garantir alto desempenho da sinterização deve-se buscar a mistura adequada de combustível sólido. Neste trabalho, a utilização de 35% de antracito e 65% de coque resultou nos melhores resultados de processo e qualidade do sinter.

A mistura de minérios com maior participação de minérios brasileiros (60%) apresentou melhores resultados em termos de resistência mecânica e propriedades metalúrgicas dos sinteres, embora com uma produtividade ligeiramente menor. Contudo, em função da menor geração de finos dessa mistura, seu uso poderia resultar também em maior disponibilidade de sinter para o alto-forno.

#### REFERÊNCIAS

- 1 NODA, H; YANAKA, H; YAMAMOTO, Y; KAWATA, H; YAMAOKA Y. Assimilative Characteristics of Iron Ores and Their Influence on Sinter Qualities. **ISIJ International**, v. 25, p. 1105, 1985.
- 2 LU, L.; HOLMES, R. J.; MANUEL, J. R. Effects of Alumina on Sintering Performance of Hematite Iron Ores. **ISIJ International**, v. 47, n. 3, p. 349–358, 2007.
- 3 PIMENTA H.P; SESHADRI, V. Influence of  $Al_2O_3$  and  $TiO_2$  on reduction degradation behaviour of sinter and hematite at low temperatures. **Ironmaking and Steelmaking**, v.. 29, n. 3, p. 175-179, 2002.
- 4 HESSIEN, M. M.; KASHIWAYA, Y. ISHII, K.; NASR, M. I.; EL-GEASSY, A. A. Sintering and heating reduction processes of alumina containing iron ore samples. **Ironmaking and Steelmaking**, v.35, n.3, p. 191-204, 2008.