

DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DE CARGA METÁLICA PARA CLIENTE ASIÁTICO BASEADO NA ANÁLISE DA SUA CADEIA DE VALOR ¹

Adriano Beltrão Clary²

Eider Reis Dutra³

Flávio de Castro Dutra⁴

Fernando Luiz Câmara Campos Júnior⁴

Resumo

Este trabalho apresenta a metodologia utilizada pela Vale para o estudo de definição de carga metálica, aplicada a um importante cliente asiático de minério de ferro. Assim, são detalhados seus principais preceitos técnicos e potencialidades, bem como resultados da cooperação técnica com o cliente focando a cadeia integrada sinterização e alto-forno. O trabalho desenvolvido no Centro de Tecnologia de Ferrosos da Vale contemplou as seguintes etapas: (i) Levantamento das especificações de qualidade do sinter, gusa e escória com o cliente e as alternativas de abastecimento de minérios de ferro para o projeto; (ii) análise preliminar das melhores alternativas de carga quanto à geração de valor ao cliente, utilizando-se de recursos de simulação numérica; (iii) análises das alternativas por simulação física da sinterização (*sinter pot*) e alto-forno (*softening & melting furnace*); (iv) identificação da melhor solução integrada de carga para o cliente. O estudo permitiu identificar misturas de minérios de ferro de elevado desempenho na sinterização. De maneira geral, a elevação da participação de minérios Vale, em detrimento a participação de minérios australianos, resultou em aumento da produtividade do processo de sinterização. Baseado em análises físicas e metalúrgicas de diferentes composições de carga metálica, definiu-se por uma carga constituída de sinter e pelotas produzidas no Sistema Norte, como sendo a de melhor desempenho e de maior potencial de geração de valor ao cliente.

Palavras-chave: Sinterização; Minério de ferro; Planta piloto; Mistura de minérios.

INTEGRATED DEVELOPMENT OF METALLIC BURDEN FOR ASIAN CLIENT BASED ON THE ANALYSIS OF VALUE CHAIN

Abstract

This work aims to present the methodology used by Vale for the definition study of metallic burden for an important Asian client of iron ore detailing the main technical precepts and potentiality. Will be present the results of technics cooperation with the client focusing the integrated sintering and blast furnace. The work was developed at Ferrous Technology Center of Vale considering the following steps: (i) to meet the quality specifications of sinter, pig iron and slag established by the client; (ii) preliminary analysis of the best alternatives by numerical simulation; (iii) analysis by physical simulation in sinter pot test and softening & melting furnace; (iv) identify the best integrated solution of metallic burden for the client. The study enabled to identify iron ore mixtures of high performance in the sintering. In general, the increase of Vale iron ore participation, rather of the Australian iron ores, promotes an increase of sintering process productivity. Based on physical and metallurgical evaluations of different metallic burden designs, a burden composed for sinter and pellets, made in North System, was established as the best performance and greater potential to generate value for the client.

Key words: Sintering; Iron ore; Pilot plant; Ore mixture.

¹ Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.

² Engenheiro Metalúrgico, Gerência Geral de Assistência Técnica ao Cliente – Depto. Marketing e Pesquisa e Desenvolvimento – Vale;

³ Engenheiro Químico, Gerência de Tecnologia em Simulação de Processos Metalúrgicos – Gerência Geral de P&D de Ferrosos – Depto. Marketing e Pesquisa e Desenvolvimento – Vale;

⁴ Engenheiro Metalúrgico, Pesquisador da Gerência de Tecnologia em Processos de Aglomeração – Gerência Geral de P&D de Ferrosos – Depto. Marketing e Pesquisa & Desenvolvimento – Vale;

1 INTRODUÇÃO

Baseado em um acordo de cooperação técnica (TCA – *Technical Cooperation Agreement*) assinado entre a Vale e um importante cliente asiático, foi realizado este estudo com o objetivo de desenvolver uma solução de carga metálica de elevado desempenho nos altos-fornos e em atendimento as especificações de qualidade de gusa e escória previamente estabelecidas pelo cliente.

Neste contexto, e em consonância com a política da Vale em oferecer aos seus clientes a melhor solução técnica e econômica, a análise considera toda a cadeia de valor do cliente (sinterização – alto-forno – aciaria), tendo por base o uso conjugado das ferramentas de simulação numérica e recursos de simulação física dos processos.

Esse trabalho, conduzido nos laboratórios do Centro de Tecnologia de Ferrosos, em Nova Lima/MG, apresenta uma síntese da metodologia adotada e dos principais resultados que resultaram na proposta de carga metálica para o cliente.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Especificações de Gusa, Escória e Sínter Aplicados à Simulação Numérica

Para o desenvolvimento do trabalho foram definidas pelo cliente premissas de qualidade de gusa, escória e sínter que serviram de referência para a etapa de simulação numérica. Essas premissas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Especificação de qualidade química de gusa, escória e sínter

COMPONENTES	COMPOSIÇÃO QUÍMICA, (% peso*).		
Escória	Basicidade Binária	MgO	Al ₂ O ₃
	1,20	4,0~8,0	≤ 15,0
Gusa	P*	Mn	
	≤ 0,11	> 0,20	
Sínter	Volume de Escória	B ₂	
	16,5% a 17,5%	1,83	

A carga metálica prevista pela equipe técnica do cliente é composta por 80% de sínter e 20% de pelota. Para a produção de sínter foram considerados os minérios de ferro apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química dos minérios de ferro

MATÉRIAS-PRIMAS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA, (%)							
	Fe _t	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	MgO	PPC
Minério A	65,94	0,014	0,80	1,23	0,047	0,699	0,051	2,14
Minério B	64,81	0,015	4,29	0,91	0,035	0,143	0,045	1,66
Minério C	65,38	0,015	3,28	1,12	0,038	0,373	0,038	1,40
Minério D	61,99	0,058	3,89	1,91	0,074	0,235	0,041	4,72
Minério E	57,81	0,048	5,06	1,61	0,052	0,027	0,054	10,58
Minério F	57,23	0,044	5,82	1,46	0,039	0,022	0,049	10,55
Minério G	61,93	0,030	3,91	1,84	0,063	0,085	0,092	5,96
Minério H	63,75	0,046	3,93	2,02	0,071	0,064	0,087	2,73

Foi utilizada uma ferramenta de simulação numérica baseada em módulos de otimização de carga para sinterização e alto-forno e previsão de qualidade

metalúrgica do sinter e produtividade da sinterização. Fixou-se como função objetivo a minimização do volume de escória do alto-forno, estabelecendo-se limites para a mistura de minérios da sinterização, a composição química prevista do sinter, o leito de fusão do alto-forno e a qualidade química do gusa.

Após a definição das misturas, simulações físicas em *sinter pot* são realizadas para observação e melhor entendimento do comportamento das misturas de minérios no processo de sinterização. O fluxo de definição das misturas a serem avaliadas na planta piloto de sinterização é mostrado na Figura 1.

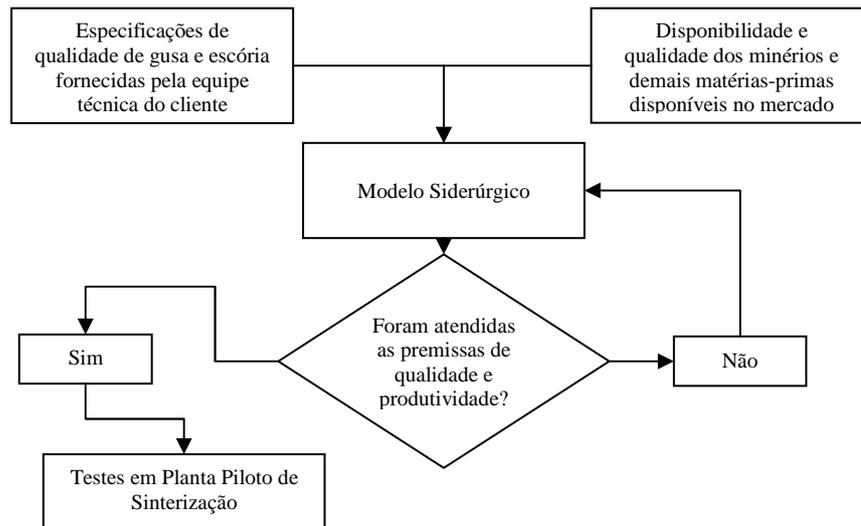


Figura 1: Fluxo para determinação das misturas a serem testadas na planta piloto de sinterização.

2.2 Misturas de Minério para os Testes Piloto de Sinterização

Após avaliações técnicas dos resultados da simulação numérica, seis misturas de minérios em potencial foram avaliadas em escala piloto. A Tabela 3 apresenta as misturas de minérios para a sinterização, bem como os resultados obtidos para a composição química do sinter, escória e gusa obtidas através da simulação numérica.

Os resultados apresentados na Tabela 3 foram à base para a definição das condições a serem avaliadas na planta piloto de sinterização.

Tabela 3: Misturas avaliadas, resultados de qualidade química do sínter, escória e gusa

	Misturas					
	Referência	1	2	2A	3	4
Minério A (%)	22,60	27,51	22,80	16,90	16,90	22,68
Minério B (%)	9,70	11,79	16,50	22,40	0,00	11,30
Minério C (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	22,40	11,30
Minério D (%)	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,35
Minério E (%)	23,60	23,70	23,70	23,70	23,70	21,34
Minério F (%)	23,70	23,70	23,70	23,70	23,70	21,34
Minério G (%)	10,60	3,50	3,50	3,50	3,50	3,17
Minério H (%)	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	5,52
Qualidade do sínter						
Fe (%)	58,00	58,00	58,10	57,80	58,00	58,00
SiO ₂ (%)	5,20	5,20	5,20	5,35	5,20	5,20
MgO (%)	0,92	0,91	0,91	0,90	0,91	1,00
Al ₂ O ₃ (%)	1,71	1,65	1,64	1,65	1,67	1,62
Volume de Escória (%)	17,30	17,30	17,30	17,70	17,30	17,30
B2	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83
Escória						
CaO/SiO ₂	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
SiO ₂ (%)	32,81	32,89	32,91	33,07	32,86	32,82
Al ₂ O ₃ (%)	14,06	13,86	13,84	13,56	13,95	13,69
MgO(%)	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,60
Escória (kg/t. gusa)	304	303	303	311	303	304
Viscosidade (poise)	2,80	2,78	2,78	2,74	2,79	2,71
Gusa						
P (%)	0,091	0,089	0,089	0,088	0,089	0,088
Mn (%)	0,41	0,45	0,42	0,36	0,43	0,44
S (%)	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011

2.3 Metodologias dos Ensaio na Sinterização Piloto

Os ensaios foram realizados de acordo com os procedimentos padrão de operação das plantas piloto de sinterização da Vale. Os parâmetros do processo de sinterização a serem simulados, tais como altura de camada de mistura e pressão de sucção, foram estabelecidos pelo próprio cliente (Tabela 4).

Tabela 4: Características e parâmetros dos ensaios piloto de sinterização

Pote	
Forma,	Cone
Diâmetro superior, mm	306
Diâmetro inferior, mm	270
Altura de leito, mm	650
Sucção na queima, mm H ₂ O	1400
Preparação de matéria-prima	
Umidade	Natural
Preparação da mistura	Misturador tipo betoneira
Misturamento (seco) / (úmido)	2 min./ 6 min.
Controle de ignição	
Intensidade	20 Mcal/m ² .min.
Temperatura	1100 °C
Tempo	60 s
Sucção	600 mm H ₂ O
Controle de queima	
Sucção	1400 mm H ₂ O
Fim de queima	Temperatura máxima do gás de exaustão
Resfriamento do síter	
Sucção	700 mm H ₂ O
Fim de resfriamento	Temperatura do gás de exaustão menor 80°C

A seguir um resumo da metodologia Vale de simulação em *sinter pot*, como também os procedimentos para avaliação da qualidade do síter e da carga metálica.

- *Técnica francesa de simulação:* os testes em *sinter pot* foram realizados adotando-se a técnica francesa (ou de retorno fechado), com o balanceamento dos finos de retorno, ou seja, combustível é adicionado ao processo até a massa de retorno incorporada a mistura ser igual à massa produzida.
- *Produção de finos de retorno:* São utilizados finos de retorno produzidos a partir de cada mistura, representando 30% em massa na mistura total.
- *Umidade ótima da mistura:* a determinação da umidade ótima é realizada a partir da queima de cada mistura com umidades variadas (variação em intervalos de 0,5% em peso). Ao final, para a identificação da umidade ótima da mistura, são considerados os seguintes parâmetros: (i) estabilidade do processo de sinterização, (ii) produtividade da sinterização, (iii) consumo específico de combustível e (iv) resistência mecânica do síter (*tumbler test*).
- *Participação de cal na mistura:* em todas as misturas foram utilizados 1,0% de cal virgem na mistura parcial, de acordo com a proposta da equipe técnica do cliente em função dos objetivos de produtividades esperados.
- *Critérios de aceitação das queimas:* para a análise dos resultados consideram-se as médias resultantes de três queimas de cada mistura com o atendimento aos seguintes critérios de variabilidade entre os resultados individuais:
 - peso de mistura carregado: $\pm 2\%$;
 - tempo de sinterização: $\pm 7\%$;
 - balanço de massa na calcinação: $\pm 2\%$; e
 - balanço de finos de retorno: $\pm 2\%$.

- *Avaliação das propriedades físicas e metalúrgicas do sínter:* Foram avaliadas as resistências mecânicas (*Tumbler ISO 3271 e Shatter Index JIS M 8711*), a degradação sob redução (*RDI – ISO 4696-2*) e a redutibilidade (*Reducibility – ISO 7215*) de cada sínter produzido.
- *Avaliação das propriedades de amolecimento e fusão da carga metálica:* de acordo com Pimenta et al.⁽¹⁾ e Ishikawa et al.⁽²⁾ uma boa maneira de avaliar o desempenho das cargas metálicas nos altos-fornos é determinada a partir da realização de ensaios de Amolecimento e Fusão com os componentes individuais (pelota e sínter) e com as cargas metálicas mistas (pelota + sínter). Neste último caso, o sínter avaliado foi aquele cuja mistura de minérios apresentou o melhor desempenho na sinterização. Os ensaios foram realizados no equipamento para medida de propriedades a altas temperaturas (Figura 2a), instalado no Centro de Tecnologia de Ferrosos, segundo procedimento padrão.

As amostras de pelota e sínter, preparadas na faixa de tamanho entre 10 e 16 mm, são inseridas em cadinho de grafite sobre uma camada de coque com 20 mm de espessura. A quantidade em massa de carga metálica utilizada é determinada pela altura desejada de 70 mm. Sobre a carga metálica, uma nova camada de coque com 20mm de altura é colocada (Figura 2b). Para uma melhor avaliação das cargas metálicas, situações diferentes de carregamento dos componentes foram analisadas no forno de amolecimento e fusão.

Durante o ensaio, o sistema de aquisição de dados coleta as temperaturas do forno inferior, do forno superior e da amostra, a queda de pressão na amostra, a composição dos gases de saída (CO, CO₂ e H₂) e a ocorrência de gotejamento. O grau de redução é calculado a partir destes dados de saída.

A seguir são apresentados os principais parâmetros usualmente utilizados para avaliar as propriedades a altas temperaturas das cargas metálicas:

- temperaturas de início e fim de amolecimento, (TS) e (TE);
- temperatura de início de gotejamento (TD);
- faixa de temperatura da zona coesiva ($\Delta T = TE - TS$);
- perda de pressão máxima do gás (ΔP_{max});
- índice de permeabilidade (S_{value} e S'_{value}); e
- grau de redução nas temperaturas de 1.000°C a 1.200°C.

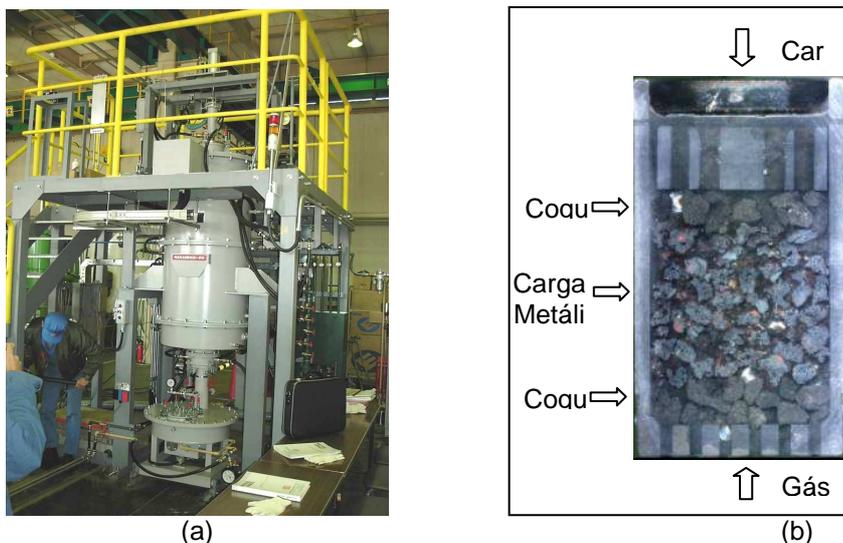


Figura 2. (a) Forno de Amolecimento e Fusão da Vale e (b) Esquema de carregamento da carga no cadinho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais resultados das avaliações realizadas na planta piloto de sinterização podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5: Desempenho do processo de sinterização e qualidade do sínter

Parâmetros	Misturas					
	Refer.	Mist. 1	Mist. 2	Mist. 2A	Mist. 3	Mist. 4
Processo						
Produtividade (t/d.m ²)	28,39	29,51	29,81	27,81	31,58	30,56
Tempo de sinterização (min)	31,82	30,99	30,34	31,79	29,12	30,10
Coke rate (kg/t sínter)	63,94	62,44	63,61	64,54	62,64	62,57
Resistência Física (%)						
Tumbler Iiso 3271, (+6,30mm)	73,08	72,37	72,92	73,97	72,65	72,98
(- 0,500mm)	6,97	7,94	6,40	6,52	6,24	6,78
Shatter JIS M8711, (+ 9,52mm)	88,09	88,49	88,38	88,83	87,84	89,45
Propriedades Metalúrgicas (%)						
RDI ISO 4696-2 (- 2,83mm)	29,40	27,60	25,10	31,30	23,30	32,50
Redutibilidade ISO 7215 – DR	75,30	73,80	69,60	72,40	75,70	75,60

3.1 Desempenho do Processo de Sinterização

O aumento da participação de minérios Vale em detrimento dos minérios australianos, tipo goetíticos/limoníticos e pisolíticos, resultou em ganhos de rendimento de sínter, produtividade do processo de sinterização e no consumo específico de combustível sólido, Figura 3.

Entre as misturas avaliadas a de melhor desempenho foi à Mistura 3, com ganhos de produtividade da ordem de 11% em relação à mistura referência.

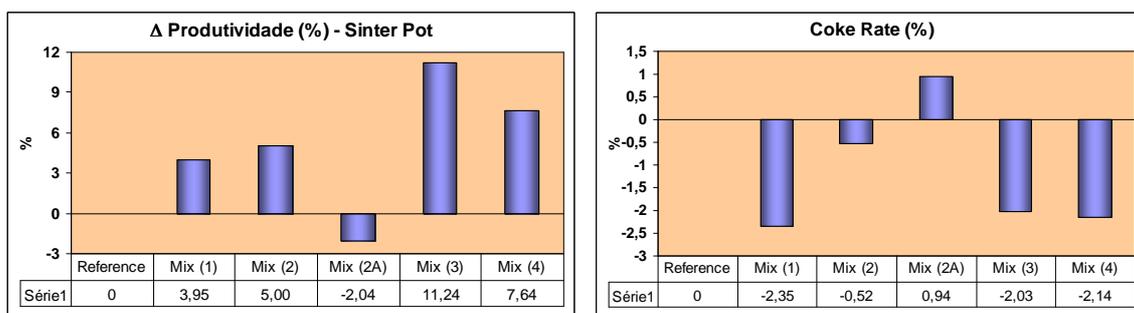


Figura 3: (a) Produtividade da sinterização. (b) Consumo específico de combustível sólido.

Isto pode ser explicado por uma combinação de características favoráveis à capacidade de aglomeração da mistura, como:

- distribuição granulométrica mais adequada em relação às outras misturas testadas (TM=2,37mm), com maior participação de material na fração nucleante (43,06%) e menor participação na fração intermediária (21,67%);
- menor tamanho médio de cristal e maior área total de poros da mistura de minérios, conforme Figuras 4 (a) e (b).

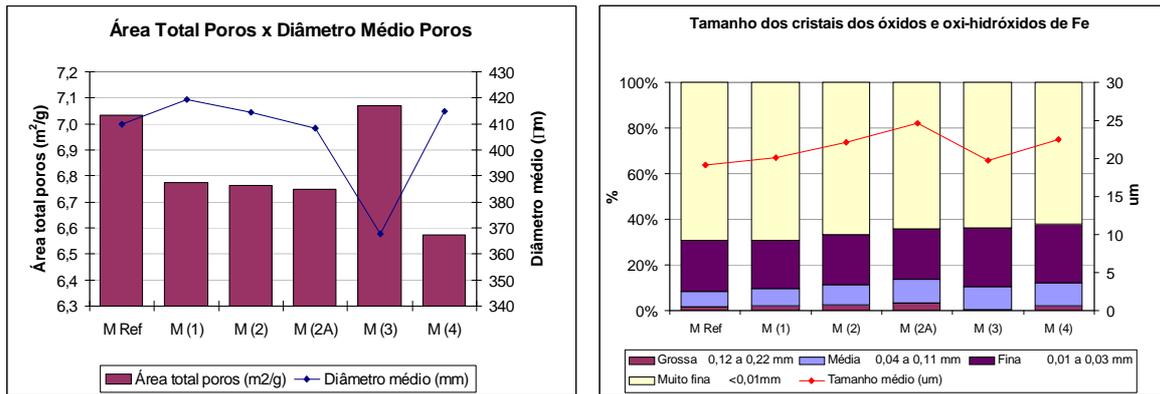


Figura 4: (a) Características dos poros das misturas avaliadas. (b) Distribuição do tamanho médio de cristal nos óxidos de Fe das misturas avaliadas.

3.2 Resistência Mecânica dos Sínteres

Quanto à resistência mecânica dos sínteres, não houve diferenças significativas em comparação com a mistura de referência (Figura 5).

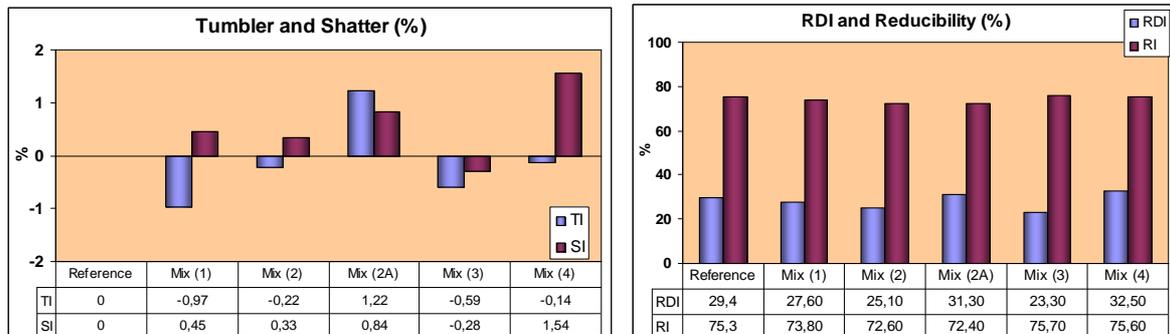


Figura 5: (a) Resistência mecânica dos sínteres. (b) RI e RDI dos sínteres.

3.3 Propriedades Metalúrgicas dos Sínteres

Entre as misturas avaliadas, o sínter obtido com a Mistura 3 resultou em melhores propriedades metalúrgicas, tendo o mais alto valor de redutibilidade (*R*) e a menor degradação sob redução (*RDI*), conforme Figura 5.

3.4 Propriedades de Amolecimento e Fusão das Cargas Metálicas

Uma carga metálica de elevado desempenho deve apresentar baixa resistência ao fluxo gasoso ao longo da sua descida no interior do alto-forno. De acordo com Pimenta, Costa e Magalhães,⁽³⁾ considerando que a perda de carga na zona coesiva representa 2/3 da perda de carga total do gás no interior do reator, é de fundamental importância que a escolha e a definição da carga metálica leve em conta o comportamento sinérgico entre os seus constituintes quanto às suas propriedades de amolecimento e fusão.

Neste trabalho, os sínteres produzidos em escala piloto foram testados no ensaio de amolecimento e fusão, individualmente e em cargas mistas com uma pelota Vale, com a intenção de se identificar uma composição de carga que resulte na menor perda de carga do gás durante o teste, representado por um baixo valor

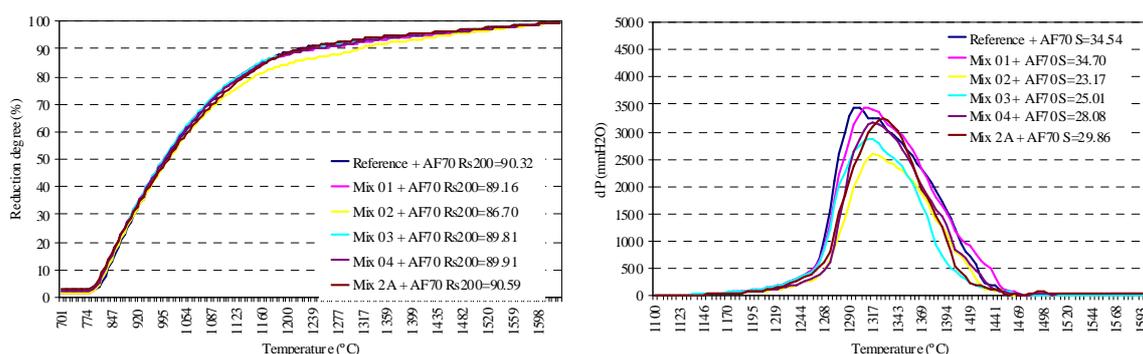
de ΔT (diferença entre as temperaturas de início de amolecimento e final de fusão) e baixo valor da área S (área abaixo da curva do gráfico $\Delta P \times$ Temperatura). A Tabela 6 apresenta os resultados consolidados dos ensaios de amolecimento e fusão.

Tabela 5: Parâmetros de amolecimento e fusão da carga metálica

Carga Metálica	TS ($\pm 0,6\%$)	TE ($\pm 0,6\%$)	ΔT ($\pm 5,0\%$)	S ($\text{kg}^*\text{C}/\text{cm}^2$) ($\pm 12,0\%$)	ΔP_{max} (mmH_2O) ($\pm 12,0\%$)
Sínter Referência	1253	1505	252	32,45	3424
Sínter 1	1248	1462	214	38,16	4358
Sínter 2	1243	1482	240	34,70	3510
Sínter 2A	1258	1546	289	36,02	3606
Sínter 3	1254	1473	220	29,19	2712
Sínter 4	1250	1472	222	35,64	3360
Sínter Refer. + Pelota	1228	1438	210	34,54	3562
Sínter 1 + Pelota	1226	1446	219	34,70	3449
Sínter 2 + Pelota	1242	1421	179	23,17	2623
Sínter 2A + Pelota	1237	1429	192	29,86	3443
Sínter 3 + Pelota	1226	1430	204	25,01	2922
Sínter 4 + Pelota	1241	1434	194	28,08	3185

Pode ser observado que a utilização de pelotas (20%) como carga complementar ao sínter resultou, em quase todas as situações, sensível melhora nos parâmetros de escoamento gasoso do reator (área S e ΔP_{max}), comparativamente a carga com 100% de sínter. Isto significa que uma melhor performance do reator poderá ser esperada (baixo *fuel rate* e alta produtividade), devido à maior permeabilidade e mais estreita espessura da zona coesiva.

A Figura 6 mostra as curvas % Redução X Temperatura e $\Delta P \times$ Temperatura para as cargas mistas constituídas por 80% sínter e 20% pelota Vale.



(a) Curvas % Redução X Temperatura

(b) Curvas $\Delta P \times$ Temperatura

Figura 6. Curvas de %Redução X Temperatura e $\Delta P \times$ Temperatura, considerando cargas mistas (80% sínter e 20% pelota).

Com base na Figura 6, pode-se concluir que, de forma geral, as cargas mistas não apresentam diferenças acentuadas quanto às propriedades a altas temperaturas (redução e amolecimento e fusão). Isto pode ser explicado pelos seguintes fatos: (i) a grande semelhança da qualidade química dos sínteres, e (ii) a pequena alteração na participação relativa dos minérios de ferro nas misturas.

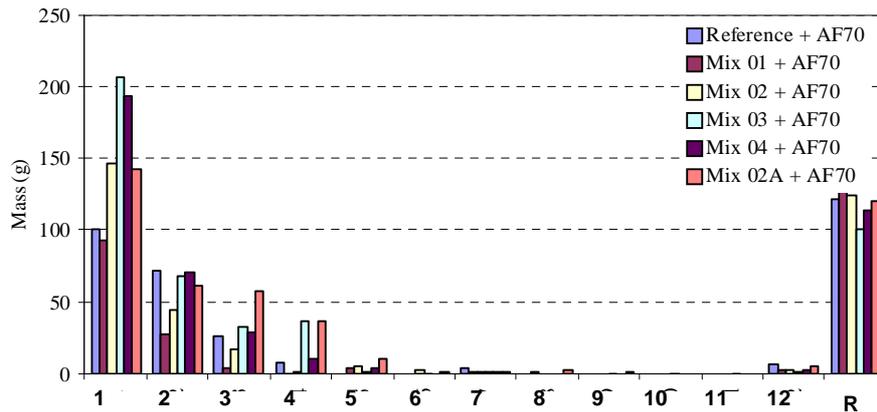


Figura 7: Perfil de gotejamento do metal líquido nas cargas mistas.

As Figuras 7 e 8 apresentam, respectivamente, as massas de metal líquido e fase escória gotejadas nos 12 recipientes coletores, durante os ensaios de amolecimento e fusão das cargas metálicas mistas (80% sínter e 20% pelota). A massa de metal remanescente, ou seja, sem gotejar, é identificada pela letra R na Figura 7. Foi observado que nas cargas compostas somente por sínter muito material fica retido dentro do cadinho, sem gotejar. Outro ponto é que o metal goteja primeiro (primeiros recipientes) e a fase escória goteja ao final do teste (último recipiente) quando a temperatura atinge temperaturas mais elevadas. A presença de material residual, sem gotejar, no interior do forno de amolecimento e fusão indica a formação de fase escória refratária e de elevado ponto de fusão, que, no alto-forno, pode resultar em instabilidade do processo, com a formação de canais preferenciais de gás.⁽¹⁾

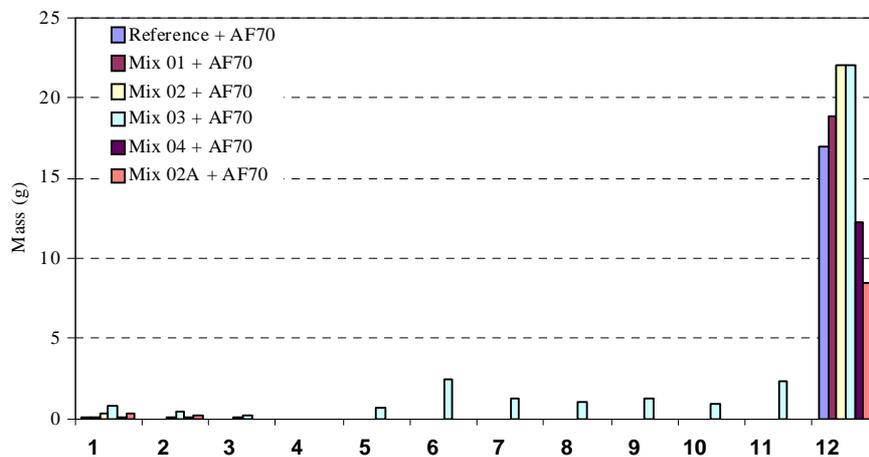


Figura 8: Perfil de gotejamento da fase escória nas cargas mistas.

As cargas mistas constituídas pelo sínter da Mistura 3 e pelota ou pelo sínter da Mistura 4 e pelota foram aquelas que apresentaram a maior quantidade de metal gotejado, conforme Figura 7. Entretanto, quanto à fase escória, percebe-se uma nítida maior quantidade de material gotejado na carga mista constituída por sínter da Mistura 3 e pelota, com melhor distribuição ao longo de todo o ensaio (Figura 8).

4 CONCLUSÕES

A escolha da melhor solução integrada de carga para o cliente deve considerar os impactos das alternativas de carga metálica sobre todas as etapas da cadeia de produção e do custo final do aço. No caso deste trabalho, foram consideradas para avaliação técnica e econômica apenas as alternativas de carga que atendessem as premissas operacionais e de qualidade estabelecidas pelo cliente.

Assim, considerando-se os resultados de desempenho das alternativas de carga nas operações unitárias de sinterização e alto-forno, foram sugeridas as Misturas 3 e 4 como as mais indicadas para a produção do sínter que irá compor a carga metálica do forno, juntamente com a pelota do projeto. Estas alternativas apresentam um maior potencial para a obtenção de elevada produtividade e menor consumo específico de combustível na sinterização e no alto-forno. Testes industriais no cliente (*trial cargoes*) são realizados para a validação da proposta.

REFERÊNCIAS

- 1 PIMENTA, H.P, et al. Desenvolvimento integrado de carga metálica para sinterização e alto-forno. In: Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.4, n.1, p. 1-7, jul.-set.2007.
- 2 ISHIKAWA, Y et al. – Recent progress in the sintering technology -High reducibility and improvement of fuel consumption, NSC – 1980.
- 3 PIMENTA, H.P., COSTA, J.D., MAGALHÃES, J.R.; Avaliação do comportamento a altas temperaturas da carga metálica dos altos-fornos da USIMINAS. XXXII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, ABM, Vitória/ES, 2002.