

PROPRIEDADES A ALTAS TEMPERATURAS DE CARGAS MISTAS: MINÉRIO – *SMALL COKE* E MINÉRIO – HBI¹

Jean Philippe Santos Gherardi de Alencar²
Ângelo Guimarães Parreira²
Vinícius de Moraes Oliveira³
Debora Turon Wagner³
Márcio Antônio Ricardo⁴

Resumo

As características da zona coesiva estão intimamente relacionadas ao desempenho do alto-forno. A espessura e o posicionamento desta zona no interior do reator de redução afetam diretamente a qualidade do escoamento gasoso e, conseqüentemente, a produtividade e o consumo de coque. Muitos pesquisadores estudaram o comportamento de cargas metálicas convencionais na zona coesiva a partir de ensaios de amolecimento e fusão (A&F). Entretanto, na última década, cargas alternativas e novas práticas de carregamento começaram a ser consideradas nestes estudos, em particular o uso de *small coke* e carga pré-metalizada. Este trabalho foi elaborado para melhor entender o comportamento destes constituintes de carga, *small coke* e *Hot Briquetted Iron* - HBI, sobre os parâmetros de A&F. Os experimentos foram realizados no forno de Amolecimento e Fusão do Centro de Tecnologia de Ferrosos da Vale em Nova Lima, Minas Gerais. Nestes experimentos foram avaliados os efeitos de diferentes proporções destes compostos sobre os principais parâmetros que definem o comportamento da carga na zona coesiva do alto-forno. Os resultados obtidos mostraram que tanto a utilização de *small coke* quanto a de HBI promovem significativos benefícios ao escoamento gasoso, com uma menor perda de permeabilidade e um maior grau de redução da carga metálica.

Palavras-chave: *Small coke*; HBI; Zona coesiva; Alto-forno.

HIGH TEMPERATURE PROPERTIES OF MIXED BURDEN: ORE – *SMALL COKE* AND ORE – HBI Abstract

The characteristics of the cohesive zone are closely related to the performance of the blast furnace. The thickness of this zone and positioning inside the reduction reactor directly affect the quality of the gas flow and, consequently, productivity and coke consumption. Many researchers studied the behavior of conventional metal burden in cohesive zone based on softening and melting tests (A & F). However, in the last decade alternative burden and new practices began to be considered in these studies, especially the use of small coke and pre-metalized burden. This study was designed to better understand the behavior of these burden elements, small coke and Briquetted Hot Iron - HBI, on the parameters of A & F. The experiments were performed in the furnace of Softening and Melting of Ferrous Technology Center of Vale in Nova Lima, Minas Gerais. These experiments evaluated the effects of different proportions of these compounds on the main parameters that define the behavior of the burden in the cohesive zone of the blast furnace. The results showed that both the use of small coke as that of HBI brings significant benefits to promote gas flow with a low permeability loss and a greater degree of reduced metal loading.

Key words: Small coke; HBI; Cohesive zone; Blast furnace.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Metallurgical Engineer; Engineer, Vale, Ferrous Technology Center, Nova Lima, MG, Brasil.

³ Metallurgical Engineer; M.Sc.; Engineer, Vale, Ferrous Technology Center; Nova Lima, MG, Brasil.

⁴ Técnico Metalúrgico; Supervisor; Vale, Ferrous Technology Center; Nova Lima, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A produção de aço no mundo é responsável por um volume considerável das emissões de CO₂ do planeta. De acordo com alguns dados do *Steel Institute* VDEh, a cadeia siderúrgica é responsável pela produção de cerca de 2,5 Gt de CO₂ por ano.⁽¹⁾ Diante deste cenário, várias iniciativas têm sido desenvolvidas tanto pelos fornecedores de matérias-primas e desenvolvedores de tecnologia quanto pelos próprios produtores de aço a fim de minimizar o volume e impacto dessas emissões sobre o meio ambiente.

De acordo com Shimizu⁽¹⁾ diversos aspectos impactam a redução de consumo de agentes redutores, combustível, no alto-forno. Ele ponderou que para se alcançar um nível de redução significativo, novas práticas inovadoras necessitam ser adotadas, juntando-se às já usuais técnicas de injeção de redutores pelas ventaneiras e diminuição da temperatura de reserva térmica.

Algumas das alternativas que têm sido utilizadas para um melhor aproveitamento do combustível utilizado nos alto-fornos são: a utilização de *small coke* misturado a carga metálica, e o carregamento de material pré-metalizado como *Direct Reduced Iron* (DRI) ou *Hot Briquetted Iron* (HBI) no reator.

Os benefícios do uso de *small coke* vão desde o aproveitamento dos finos de coque gerados durante seu manuseio na usina até a melhora da permeabilidade e da redutibilidade da carga metálica, dada a proximidade entre a carga ferrosa e a redutora. Por outro lado, alguns fatores limitam a sua utilização em altas proporções da carga, tais como a determinação da faixa granulométrica ideal do *small coke*, sua disponibilidade, o controle de seu carregamento, e o tamanho das janelas de coque. Quanto à utilização de carga pré-metalizada em substituição parcial à carga padrão do alto-forno visa, principalmente, o aumento da produtividade do reator. Muitos trabalhos, como o de Gupta,⁽²⁾ mostram que o uso de qualquer carga metalizada no alto-forno tem o poder de diminuir o consumo de coque e aumentar a produtividade. Todavia, o uso de DRI e HBI se torna mais interessante uma vez que concilia a resistência mecânica necessária com a forma e tamanho já propícios para o uso nestes reatores. Smailer⁽³⁾ apresentou simulações numéricas da utilização de HBI no alto-forno mostrando que um incremento de 10% na metalização da carga acarreta em um aumento de 8% na produtividade e uma redução de 7% no consumo de combustível no reator.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar e entender os efeitos do uso de *small coke* e HBI sobre as propriedades a altas temperaturas de carga metálica típica constituída por sinter e/ou pelota, visando servir como suporte a estudos futuros de solução de carga.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Metodologia

A avaliação das propriedades a altas temperaturas da carga metálica foi realizada no Forno de Amolecimento e Fusão (A&F) do Centro de Tecnologia de Ferrosos - CTF da Vale. O equipamento e a metodologia estão melhor detalhados em trabalho anterior de Castro, Pimenta e Carneiro.⁽⁴⁾ A Figura 1 mostra uma figura esquemática do forno.

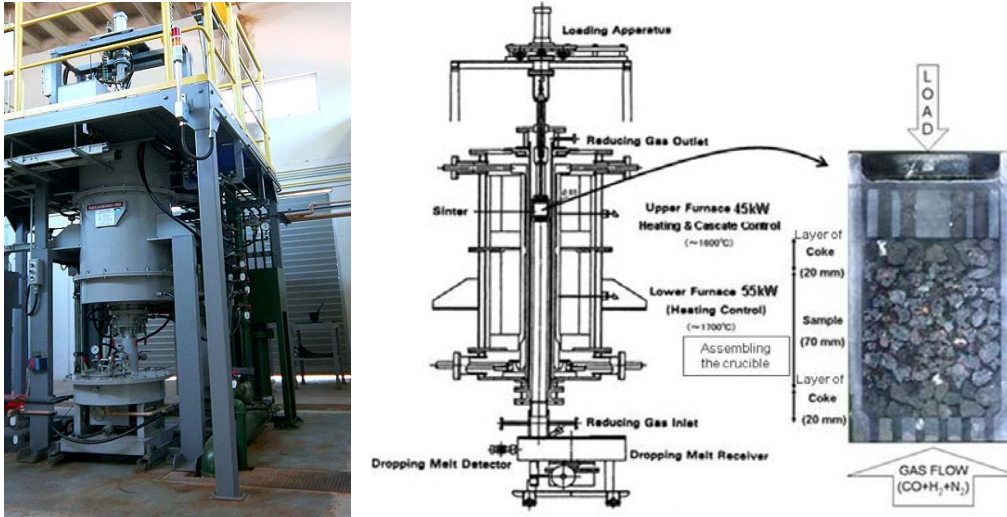


Figura 1. Imagem e esquema do forno de amolecimento e fusão existente no CTF da Vale S.A.

O procedimento, resumidamente, consiste no carregamento da amostra de carga metálica entre duas camadas de coque em um cadinho de grafite (100mm de diâmetro e 180mm de altura) que é posicionado na região central do forno superior. Os gases redutores entram no sistema a partir de 800°C e o aquecimento ocorre até o gotejamento do material.

No ensaio de A&F são monitorados diversos parâmetros relativos à carga metálica avaliada, os quais são mostrados no esquema da Figura 2.

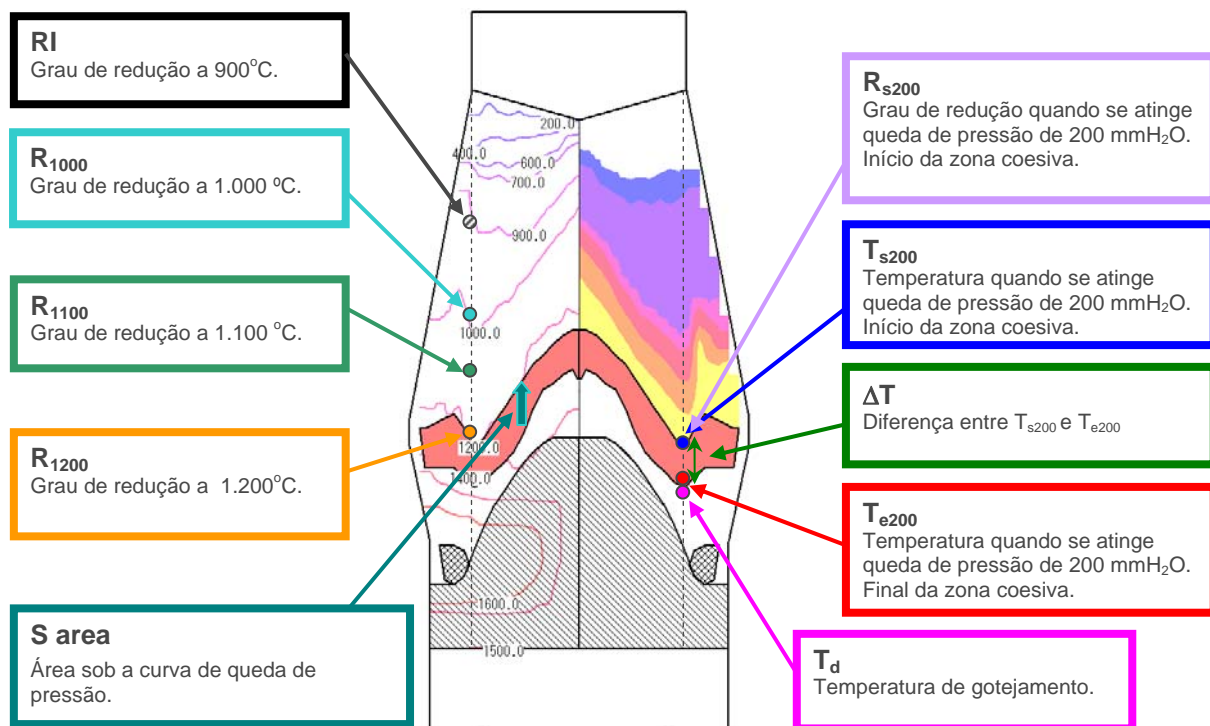


Figura 2. Esquema mostrando alguns dos parâmetros medidos pelo ensaio de A&F.

2.2 Materiais

No presente trabalho foram utilizados cinco materiais distintos nos ensaios de A&F: pelota, sinter, dois tipos de HBI e coque metalúrgico. A pelota foi produzida

industrialmente, assim como o coque. Já o sinter e o HBI foram produzidos em escala piloto, no CTF da Vale e no laboratório da Midrex®, respectivamente. Os dois tipos de HBI avaliados foram produzidos a partir de pelotas de alto-forno do portfólio da Vale.

A faixa granulométrica das matérias-primas destinadas aos testes de A&F foram de 10-16mm, com exceção do *small coke* que teve outras faixas consideradas para o teste. Não obstante, o HBI que inicialmente tinha o tamanho de 60mm de comprimento foi cominuído com auxílio de um britador até alcançar uma faixa de tamanho entre 10-16mm.

As Tabelas 1 e 2 mostram as qualidades químicas das matérias-primas que foram utilizadas para compor as cargas metálicas mistas.

Tabela 1. Qualidade química da carga metálica (%)

Material	Fe	FeO	G.M.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	MgO	CaO	C
Pelota	66,2	0,40	-	2,26	0,50	0,03	0,05	0,05	2,44	-
Sinter	56,5	9,83	-	5,22	1,28	0,05	0,43	1,69	9,58	-
HBI 1	86,6	-	94,7	3,44	1,67	0,02	0,76	0,10	3,24	0,92
HBI 2	82,8	-	89,6	3,25	0,76	0,03	0,08	0,07	3,50	0,80

Tabela 2. Qualidade química do *small coke* (%)

Material	Carbono Fixo	M. Voláteis	Cinzas	Umidade
Coque	88,62	1,64	9,75	0,49

2.3 Plano de Testes

A avaliação dos efeitos do uso de *small coke* e HBI sobre as propriedades a altas temperaturas da carga metálica foi realizada em diferentes etapas.

2.3.1 Testes com *small coke*

No caso do *small coke*, optou-se por avaliar uma carga apenas constituída por pelotas. O *small coke* foi preparado a partir do coque metalúrgico e testado em diferentes faixas granulométricas.

Na Fase I dos experimentos avaliou-se o aumento da proporção de *small coke* misturado à carga de pelotas, mantendo-se a granulometria constante (10,0 a 16,0mm). Já na Fase II, a massa foi mantida constante e variou-se a granulometria do *small coke*. Detalhes dos experimentos são descritos nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Testes com variação na quantidade de *small coke* (SC) – Fase I

Teste	Descrição	Kg SC/t gusa
SC I - 1	720g de pelota	-
SC I - 2	720g de pelota + 36 g de <i>small coke</i>	81,4
SC I - 3	720g de pelota + 80 g de <i>small coke</i>	180,8
SC I - 4	720g de pelota + 98g de <i>small coke</i>	221,5

Tabela 4. Testes com variação da granulometria do *small coke* (SC) – Fase II

Teste	Descrição	Kg SC/t gusa
SC II - 1	720g de pelota + 80 g de <i>small coke</i> (10,00 – 16,00 mm)	180,8
SC II - 2	720g de pelota + 80 g de <i>small coke</i> (6,30 – 10,00 mm)	180,8
SC II - 3	720g de pelota + 80 g de <i>small coke</i> (3,36 – 6,30 mm)	180,8

2.3.2 Testes com HBI

Os testes com HBI foram realizados a partir de um caso base, cuja carga era composta por 30% de pelota e 70% de sínter. A participação do HBI na carga foi aumentada gradualmente em substituição à pelota, para ambos os tipos de HBI (Tabela 5).

Tabela 5. Testes para avaliação do uso de HBI

Teste	Descrição
HBI – 1	30% pelota e 70% sínter
HBI – 2	10% HBI 1 + 20% pelota + 70% sínter
HBI – 3	20% HBI 1 + 10% pelota + 70% sínter
HBI – 4	30% HBI 1 + 70% sínter
HBI – 5	10% HBI 2 + 20% pelota + 70% sínter
HBI – 6	20% HBI 2 + 10% pelota + 70% sínter
HBI – 7	30% HBI 2 + 70% sínter

Todos os testes planejados foram executados em duplicata e os valores apresentados como resposta de cada parâmetro é o valor médio obtido.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Carga Metálica com *Small Coke*

Os resultados obtidos nas Fases I e II mostram que houve impacto significativo da presença de *small coke* misturado à carga metálica, tanto nos parâmetros de permeabilidade quanto nos de redução (Tabela 6).

Tabela 6. Parâmetros de A&F para cargas de pelotas com *small coke* - FASE

Carga	T _{s200} (°C)	T _{e200} (°C)	ΔT (°C)	T _d (°C)	S area (kg.°C/cm ²)	ΔP _{max} (mmH ₂ O)	R _{s200} (%)	R ₁₀₀₀ (%)	R ₁₁₀₀ (%)	R ₁₂₀₀ (%)
SC I – 1	1.183	1.334	152	1.337	15,75	2.331	63,23	32,77	52,77	64,85
SC I – 2	1.299	1.334	35	1.361	0,87	696	68,76	34,98	54,60	65,12
SC I – 3	1.318	1.325	7	1.363	0,09	302	78,94	38,12	58,19	71,88
SC I – 4	1.316	1.329	13	1.345	0,08	291	77,98	38,35	59,60	71,91
SC II – 1	1.318	1.325	7	1.363	0,09	302	78,94	38,12	58,19	71,88
SC II – 2	1.317	1.321	4	1.319	0,03	246	79,37	36,36	57,72	72,07
SC II – 3	1.319	1.326	7	1.324	0,07	293	81,08	36,37	58,64	73,49

Os parâmetros mais impactados pelo uso de *small coke* foram os relativos à perda de carga do gás, os quais apresentaram melhoras significativas. Acredita-se que a presença do *small coke* cria lacunas permeáveis aos gases redutores mesmo quando a carga ferrosa já está fluida. Nota-se também que a relação entre a perda de carga e a quantidade de *small coke* misturado à carga ferrosa é uma curva exponencial e com viés assintótico, semelhante ao que foi observado por Watakabe, Murao e Goto.⁽⁵⁾

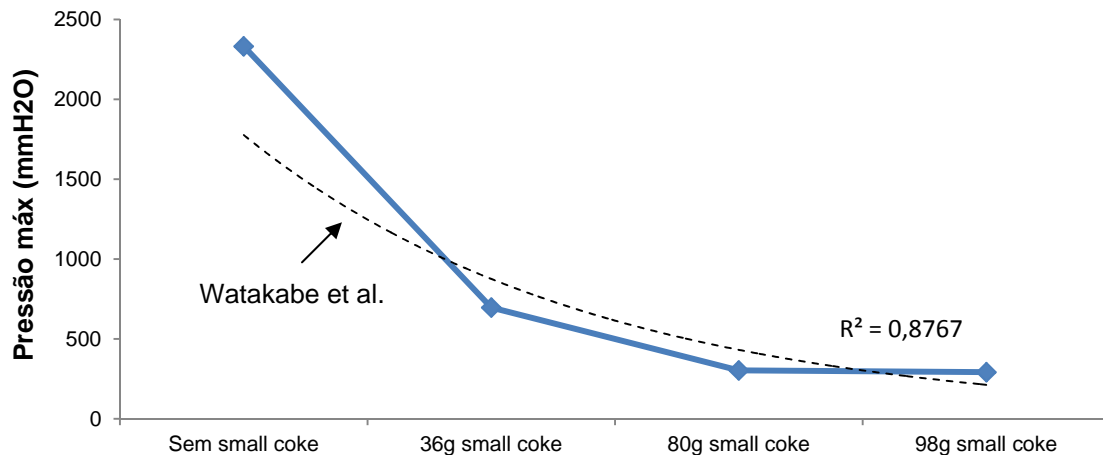


Figura 3. Efeito da proporção de *small coke* na carga ferrosa sobre a permeabilidade do leito.

No que diz respeito aos parâmetros de redução, percebe-se pela Figura 4 que o efeito da proporção de *small coke* na carga foi relevante sobre o comportamento de redução do sistema. De forma regular, verifica-se que as cargas que têm maior proporção de *small coke* apresentaram uma intensidade de redução mais significativa do que as demais. Destaque para o parâmetro de redução “ R_{s200} ”, o qual indica o índice de redução da carga metálica no instante do início do fenômeno de amolecimento. Pela análise dos parâmetros R_{s200} e do T_{s200} pode-se inferir que a carga metálica teve o início de amolecimento postergado com a presença do *small coke* o que favoreceu a exposição aos agentes redutores gasosos. O aumento do R_{s200} da carga metálica com *small coke* chega a ser superior a 15% em relação à uma carga apenas com pelotas.

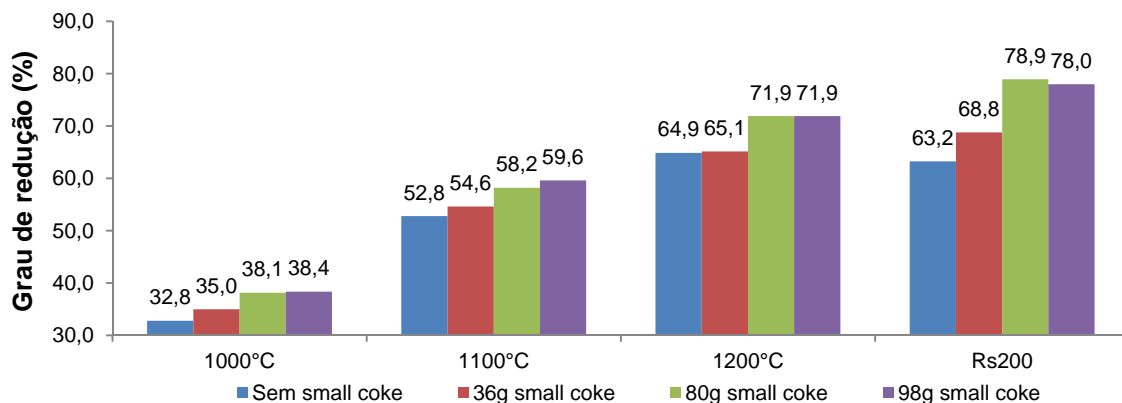


Figura 4. Efeito da proporção de *small coke* na carga ferrosa sobre a intensidade de redução.

Por outro lado, constatou-se que a granulometria do *small coke* misturado a carga ferrosa não foi um fator significativo nos parâmetros de amolecimento e fusão.

3.2 Carga Metálica Mista com HBI

Os resultados obtidos nos ensaios de A&F de cargas mistas com HBI foram compilados na Tabela 7. Observando-se estes dados nota-se que o HBI, em substituição à pelota, teve impacto relevante em praticamente todos os parâmetros.

Tabela 7. Parâmetros de A&F para cargas mistas com HBI

Carga	T _{s200} (°C)	T _{e200} (°C)	ΔT (°C)	T _d (°C)	S area (kg.°C/cm ²)	ΔP _{max} (mmH ₂ O)	R _{s200} (%)	R ₁₀₀₀ (%)	R ₁₁₀₀ (%)	R ₁₂₀₀ (%)
HBI – 1	1.264	1.436	172	1.452	18,04	2.480	86,2	45,0	68,4	82,7
HBI – 2	1.272	1.408	136	1.428	11,86	1.902	89,6	55,2	74,6	86,5
HBI – 3	1.280	1.416	136	1.427	8,48	1.347	90,6	61,8	78,2	87,6
HBI – 4	1.325	1.395	70	1.417	0,41	280	92,6	67,1	80,9	88,7
HBI – 5	1.276	1.414	138	1.430	8,18	1.317	89,3	53,5	73,4	85,4
HBI – 6	1.286	1.414	129	1.434	1,80	477	90,9	60,5	77,1	87,6
HBI – 7	1.298	1.404	106	1.334	0,23	255	91,9	66,5	80,8	88,9

É interessante notar que, assim como no caso do uso de *small coke*, o uso de HBI teve uma influência forte sobre os parâmetros de perda de carga. Tal característica também foi observada no trabalho de Kaushik e Fruehan,⁽⁶⁻⁸⁾ onde é citado que o impacto do uso HBI como constituinte da carga ferrosa de altos-fornos leva à formação de uma zona coesiva estreita e com o mínimo de queda de pressão. As Figuras 5 e 6 mostram, respectivamente, os efeitos positivos do uso do HBI misturado à carga metálica sobre a permeabilidade do leito (S area) e a espessura da zona coesiva formada no alto-forno (ΔT).

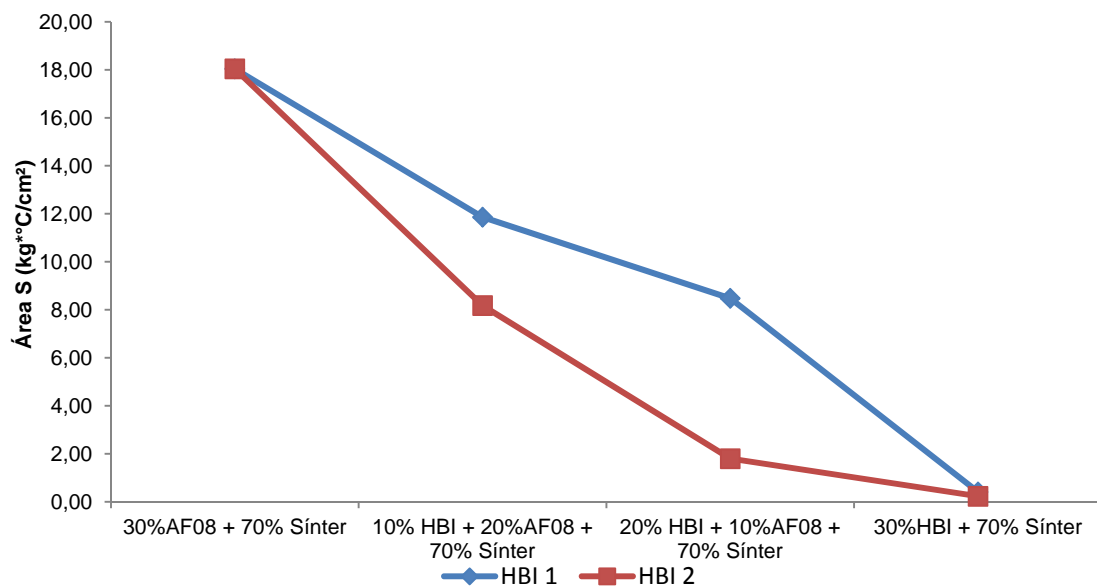


Figura 5. Efeito do HBI na permeabilidade da carga metálica, representada pela Área S.



Figura 6. Efeito do HBI na espessura da zona coesiva, representada por ΔT .

Kaushik e Fruehan⁽⁶⁻⁸⁾ também citam em seus trabalhos que as temperaturas de amolecimento e fusão de cargas ferrosas diferem-se entre a sua parte metálica e a parte oxidada. A primeira depende da resistência do material frente à formação de fase líquida e da intensidade de carburização que ocorre no mesmo. Já a temperatura de início de amolecimento da parte oxidada é controlada, basicamente, pela formação das escórias primárias de cada carga, assim como comentado por Nogueira.⁽⁹⁾ Neste sentido, levando-se em conta os resultados da Tabela 7, pode-se notar que a medida que a participação do HBI aumentou na carga, em detrimento da participação de pelota, a temperatura de início de amolecimento também se elevou dada a maior quantidade de agentes escorificantes no HBI. Por outro lado, a presença de carbono no HBI reduz a temperatura de fusão do mesmo e diminui a temperatura de gotejamento do metal.

Quanto ao grau de redução, observa-se que a participação de HBI na carga aumentou o grau de redução como um todo. Comparando-se os valores obtidos para o parâmetro " R_{s200} " nota-se que a carga com mais HBI atingiu a temperatura de início de amolecimento tendo sofrido uma redução 6% maior que a carga referência com pelota e isto implica em um menor consumo de combustível no alto-forno.

As Figuras 7 e 8 mostram o efeito do uso do HBI misturado à carga metálica sobre os parâmetros de redutibilidade da carga.

Quanto ao efeito do grau de metalização do HBI, nota-se que o grau de redução final da carga foi semelhante tanto para o HBI de alta metalização (HBI 1) quanto para o HBI de baixa metalização (HBI 2) apesar das diferenças entre eles.

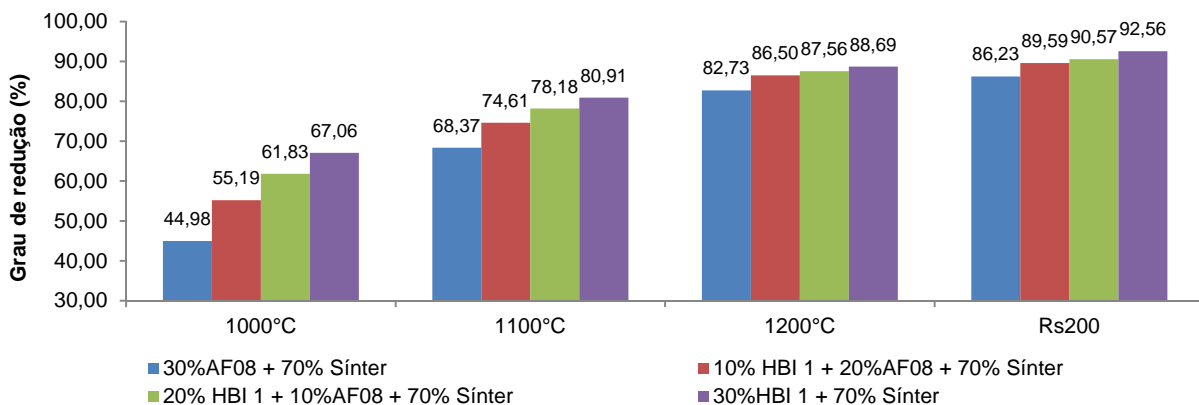


Figura 7. Efeito do HBI 1 (elevada metalização) sobre a redutibilidade da carga mista.

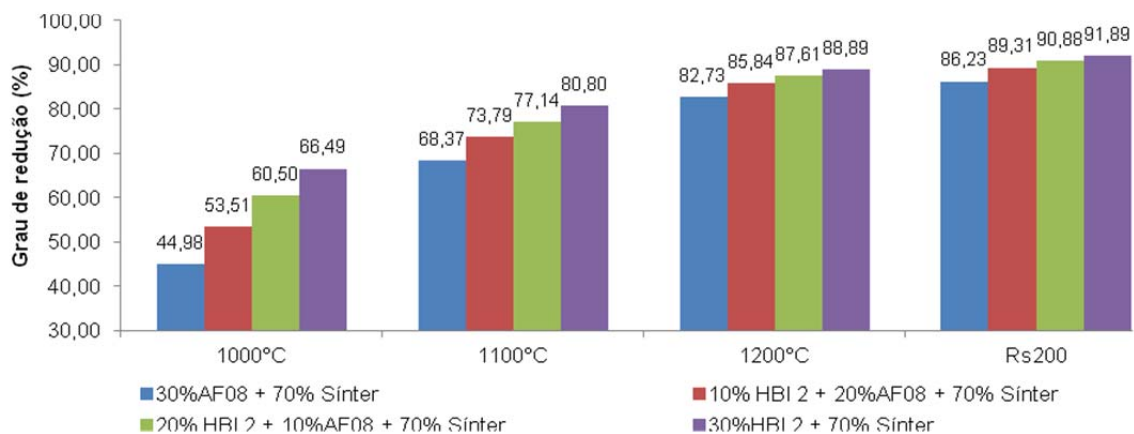


Figura 8. Efeito do HBI 2 (baixa metalização) sobre a redutibilidade da carga mista.

4 CONCLUSÃO

Os efeitos do uso de *small coke* e HBI sobre as propriedades a altas temperaturas de cargas metálicas constituídas por sinter e/ou pelota foram investigados por meio de ensaios de amolecimento e fusão. Os seguintes resultados foram obtidos neste trabalho:

- tanto a utilização de *small coke* quanto o HBI misturados à carga metálica favorecem intensamente o desempenho da carga metálica no reator, caracterizado pelas suas propriedades de amolecimento & fusão;
- no caso específico do uso do *small coke* os parâmetros que caracterizam a espessura da zona coesiva (ΔT), a permeabilidade da carga (Área S e ΔP_{\max}) e a capacidade de redução (R_T e T_{s200}) foram todos positivamente afetados. Isso representa uma melhoria nas condições fluido-dinâmicas na zona coesiva e no interior do reator como um todo;
- a granulometria do *small coke* misturado a carga ferrosa não foi um fator significativo de influência sobre os parâmetros de amolecimento e fusão.
- em relação ao uso de HBI na carga ferrosa foram observados os mesmos efeitos positivos obtidos com o *small coke*. A presença do HBI na carga metálica tende a formar uma zona de amolecimento e fusão mais estreita e com baixa perda de carga;
- nos níveis avaliados, o grau de metalização do HBI não apresentou influência significativa sobre o comportamento da carga metálica na zona coesiva, em especial, o grau de redução final da carga; e
- dessa forma, pode-se concluir que tanto a utilização de *small coke* quanto de HBI em cargas metálicas contribuem significativamente para uma melhor condição fluido-dinâmica no interior do forno, um menor consumo de coque e, conseqüentemente, minimizam a geração de CO_2 e os impactos ambientais.

Esse conhecimento visa suportar o desenvolvimento de produtos e de soluções em cargas metálicas de mais alto desempenho, considerando-se que o uso do *small coke* e de pré-metalizados vem se tornando prática comum na siderurgia.

REFERÊNCIAS

- 1 SHIMIZU, M. - View Points and Possibility for Innovation of Blast Furnace Ironmaking. *1st International Seminar on Self-Reducing and Cold Bonded Agglomeration*, 2008, pp. 228 – 235.
- 2 GUPTA, R. C. - Alternatives Routes of Iron and Steelmaking. *The AUSIMM and CSIR Minerals*, 1999, p. 59-64.
- 3 SMAILER, R. - HBI Use in Blast Furnace. *Hot Briquetted Iron Seminar, AISTech2006*, Cleveland, April, 2006.
- 4 CASTRO, A.; PIMENTA, H. e CARNEIRO, R. - Zona coesiva do alto-forno: a CVRD se capacita para abrir esta caixa preta. *Revista Metalurgia & Materiais, ABM*, Vol. 60, 548, setembro, 2004, p.547-549.
- 5 WATAKABE, S.; MURAO, A.; GOTO, S. - Application of High Ratio Coke Mixed Charging Technique to Blast Furnace. *JFE Technical Report*. n° 13, Maio 2009, p.21.
- 6 KAUSHIK, P.; FRUEHAN, R. J. - Mixed Burden and Melting Phenomena in Blast Furnace Operation Part 1 – X-ray Observation of Ferrous Burden. *Ironmaking and Steelmaking*, 2006, vol. 33, n° 6, p.507-519.
- 7 KAUSHIK, P.; FRUEHAN, R. J. - Mixed Burden and Melting Phenomena in Blast Furnace Operation Part 2 – Mechanism of Softening and Melting and Impact on Cohesive Zone. *Ironmaking and Steelmaking*, 2006, vol. 33, n° 6, p.520-528.
- 8 KAUSHIK, P.; FRUEHAN, R. J. - Mixed Burden and Melting Phenomena in Blast Furnace Operation Part 3 – Mechanism of Burden Interaction and Melt Exudation Phenomenon. *Ironmaking and Steelmaking*, 2007, vol. 34, n° 1, p.10-22.
- 9 NOGUEIRA, P. F. - Blast Furnace Burden Softening and Melting Phenomena. PhD Thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 2003.