

# AVALIAÇÃO DO EFEITO DO HIDROGÊNIO NA REDUÇÃO DA CARGA METÁLICA EM ALTO-FORNO\*

Beatriz Fausta Gandra<sup>1</sup>  
Larissa Rodrigues de Carvalho Rocha<sup>2</sup>  
Mauro Vivaldino Fernandes<sup>3</sup>

## Resumo

A composição química do gás redutor afeta, de forma marcante, sua difusividade através do leito e a capacidade de redução da carga metálica. Associado a isto, o cenário econômico e ambiental indica a necessidade de se buscar cada vez mais elevada produtividade dos altos-fornos, com baixo consumo de combustível e menor emissão de CO<sub>2</sub>. Para tanto, as empresas têm buscado operar com elevada taxa de injeção de carvão e, em casos de política favorável, intensificar o uso de gás natural em altos-fornos. Nestes casos, a quantidade de material reduzida via H<sub>2</sub>, em comparação ao CO, é aumentada. No presente trabalho, são apresentados os resultados de ensaios em amolecimento e fusão (A&F) de dois tipos de granulados, de um tipo de pelota e de um sinter industrial, utilizando-se como redutor um gás com diferentes teores de H<sub>2</sub> (0% a 12%). Verificou-se que, para o granulado, não há uma tendência definida. Embora um maior teor de hidrogênio possa favorecer a redução, isto não refletiu em melhor permeabilidade do leito. No caso da pelota estudada, houve leve tendência de melhora nos parâmetros avaliados quando se tem o gás mais rico em hidrogênio. No entanto, seu desempenho em A&F foi muito aquém daquele esperado para este tipo de carga, uma vez que apresentou elevada resistência à permeabilidade associada à baixa redutibilidade até o início do amolecimento. Para o sinter, foi identificada evidente melhora nos aspectos de redução e de permeabilidade do leito.

**Palavras-chave:** Alto-Forno; Cadinho; Gusa.

## EVALUATION OF THE HYDROGEN'S EFFECT IN THE METALLIC BURDEN REDUCTION

### Abstract

Reducing gas' chemical composition affects significantly its diffusivity through the bed and the ability to reduce the metallic burden. Moreover, the economic and environmental scenario demands increasingly productivity of blast furnaces, with low fuel rate and lower CO<sub>2</sub> emissions. Therefore, companies have pursued a high coal injection rate and, in cases of favorable policy, intensify the natural gas use. In these cases, the amount of material reduced via H<sub>2</sub> as compared to CO is increased. In the present paper, the results of softening and melting (S&M) of two types of NPO, one kind of pellet and industrial sinter are presented, using as reductant gas with different content of H<sub>2</sub> (0% to 12%). It was found that, for the NPO, there is no definite trend. Although higher hydrogen content could favor the reduction, this did not reflect in better bed permeability. In the pellet case, there was a slight tendency of improvement in the evaluated parameters when the gas richest in hydrogen was used. However, its performance in S&M was less than expected, since it presented high resistance to permeability associated with low reducibility until the softening. For sinter, was identified a clear improvement in reduction and bed permeability aspects.

**Keywords:** Blast Furnace; Hearth; Hot Metal.

<sup>1</sup> Membro da ABM; Engenheira Metalurgista, M. Sc., Pesquisadora, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira Metalurgista, Pesquisadora, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M. Sc., Gerência Técnica de Redução da Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Em operação de altos-fornos, entende-se que a permeabilidade da carga à passagem dos gases é muito importante para menor consumo de coque e altas taxas de injeção de combustíveis auxiliares, especialmente em equipamentos de maior porte. Por outro lado, a composição química do gás redutor afeta fortemente a sua difusividade através do leito e a sua capacidade de redução da carga metálica, o que reflete na eficiência do reator em termos de produtividade e *fuel rate*. Associado a isto, o cenário econômico e ambiental indica a necessidade de se buscar cada vez mais a operação eficaz de altos-fornos, que consiste em estabilidade operacional, elevada produtividade e baixo consumo de combustível, com menor emissão de CO<sub>2</sub>. [1]

Para se atingir estes objetivos, as empresas têm buscado operar com elevada taxa de injeção, desenvolver meios de se reutilizar o próprio gás de alto-forno (BFG) ou gás de coqueria (COG) no processo de redução [2] e, em casos de política de preços favorável, intensificar o uso de gás natural (GN) em altos-fornos. Em todos os casos, a quantidade de material que será reduzido via H<sub>2</sub> em comparação ao CO é aumentada. Contudo, o efeito deste gás nas condições físicas e químicas da carga metálica, bem como a sua relação com os demais compostos gasosos no interior do alto-forno, ainda é pouco conhecido.

Assim, buscou-se nesse estudo analisar o efeito do hidrogênio no processo de redução de diferentes composições de cargas metálicas (sínter, pelota e minério granulado) considerando os aspectos relacionados à cinética de reação e à permeabilidade do leito.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

#### 2.1.1. Carga metálica

Foram analisados dois tipos de minério granulado (NPO-A e NPO-B), um tipo de pelota e o sínter industrial. A composição química dos materiais é apresentada na tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química dos materiais metálicos avaliados

Composição Química (% em peso)	Fe <sub>T</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PPC	CaO/SiO <sub>2</sub>	Escorificantes*
NPO-A	65,1	5,22	0,01	2,31	3,15	<0,05	0,05	0,08	1,42	0,005	6,00
NPO-B	57,8	0,68	0,02	7,86	1,56	0,06	0,13	0,24	8,17	0,002	9,42
Pelota	64,0	0,43	2,44	4,44	0,7	0,59	0,12	0,07	0,04	0,550	8,45
Sínter	56,2	4,90	9,97	6,17	1,59	1,23	0,39	0,15	<0,01	1,616	19,63

\* somatório de todos os óxidos, à exceção óxido de ferro.

#### 2.1.2. Gases redutores

A composição dos gases redutores está indicada na tabela 2. A variação entre os teores de hidrogênio e monóxido de carbono tem equivalência com a taxa de injeção de combustíveis pelas ventaneiras, sendo mantido constante o percentual de N<sub>2</sub> para todos os testes realizados.

**Tabela 2.** Composição química dos gases redutores

Composição Química (%)			Equivalência (PCI*, em kg/t)
H <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>	
0	32,94	67,06	0
3,8	29,14		80**
4,8	28,14		120
5,8	27,14		160
6,8	26,14		200
8,0	24,94		100 + ~20 kg/t de GN
12,8	20,14		80 + ~50 kg/t de GN***

\* PCI: Taxa de injeção de carvão pulverizado

\*\*devido a proximidade do padrão, foi utilizado como condição referência

\*\*\*condição avaliada apenas para a amostra de sínter

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Caracterização dos materiais

Para determinação da granulometria, o ensaio foi processado a seco e executado por meio de conjuntos de peneiras adequadas à necessidade de cada material.

A caracterização mineralógica foi realizada por meio da difração de raios-X e microscopia óptica no CP&D da Usiminas. Considera-se a primeira análise qualitativa, uma vez que apenas identifica a ocorrência das principais fases mineralógicas, por meio da comparação dos difratogramas obtidos com padrões conhecidos. A microscopia óptica de luz refletida fornece mais detalhes acerca do material, com a identificação de cada constituinte, suas características morfológicas e aspectos microtexturais importantes. As análises foram realizadas em microscópios ópticos de luz refletida, utilizando luz polarizada e normal (intensidade fixada em 10 V), através das objetivas de aumento de 10x, 20x, 50x e 100x.

Em termos de resistência mecânica dos granulados e do sínter, foram realizados os ensaios de *shatter test* (JIS M 8711 [3]) e *tumbler test* (ISO 3271 [4]). O primeiro consiste em submeter a amostra ao esforço de impacto e o segundo ao impacto e à abrasão. Após os testes, o material passa por classificação granulométrica. Os resultados do ensaio são apresentados pela porcentagem da massa retida na peneira de malha de 10 mm. Para a pelota, a resistência física é indicada pelo ensaio de compressão (ISO 4700 [5]). Tal ensaio é destrutivo e cada uma das 100 unidades avaliadas tem seu valor medido e representado pela média aritmética dos valores individuais, determinados em kgf ou daN.

Para avaliar o comportamento metalúrgico dos materiais, foram realizados os ensaios de degradação sob redução (RDI: ISO 4696-1 [6]) e redutibilidade (RI: ISO 7215 [7]), tabela 3. O RDI mede a degradação granulométrica durante sua redução, avaliada por meio do material passante na peneira de 3,15 mm e de 0,5 mm. O RI mede a quantidade de oxigênio retirado da amostra, pelo CO, em tempo e temperatura fixos.

**Tabela 3.** Detalhe dos ensaios de RDI e de RI

Ensaio	RDI (ISO 4696-1)	RI (ISO 7215)
Granulometria	10,0 mm a 12,5 mm	18 mm a 20 mm (sínter e NPO) 10 mm a 12,5 mm (pelota)
Gás redutor	20% CO + 20% CO <sub>2</sub> + 2% H <sub>2</sub> + 58% N <sub>2</sub>	30% de CO e 70% de N <sub>2</sub>
Temperatura de ensaio	500°C	900°C

Para os minérios granulados (NPO), foi realizado o ensaio de crepitação (ISO 8371), que indica a geração de finos do material ao ser aquecido de maneira brusca no interior do alto-forno. Para a pelota, foi realizado o ensaio de inchamento (ISO 4698), que determina o seu aumento de volume ao ser submetida ao processo de redução no alto-forno.

## 2.2.2 Ensaios em amolecimento e fusão (A&F)

Os testes foram realizados conforme procedimento operacional do Laboratório de Redução [8], utilizando-se a composição química padrão do gás redutor (67% N<sub>2</sub>, 29,4% CO, e 3,6% H<sub>2</sub>), além das demais condições indicadas na tabela 2. A amostra de carga metálica é colocada entre duas camadas de coque dentro de um cadinho de grafite (85 mm de diâmetro e 110 mm de altura) posicionado no centro do forno. Devido a estas dimensões, em procedimento padrão de operação, as matérias-primas são preparadas numa granulometria controlada, ligeiramente inferior àquela utilizada no alto-forno (10 mm a 15 mm). A quantidade de carga metálica é definida pela altura da amostra dentro do cadinho, que deve ser de 70 mm. As camadas inferior e superior de coque são de 20 mm. O fundo do cadinho é em forma de grade o que permite o gotejamento do material líquido.

As amostras são aquecidas sob um fluxo de 34 NL/min de N<sub>2</sub> a uma taxa de aquecimento de 10°C/min. A 800°C, uma pressão de 98 kPa é aplicada na amostra e se inicia a passagem do gás redutor (o fluxo continua igual a 34 NL/min). A 1000°C a taxa de aquecimento do forno superior é alterada para 5°C/min, e o aquecimento prossegue até atingir 1550°C. O aquecimento do forno inferior prossegue a 10°C/min até 1650°C. Ao final do ensaio, a refrigeração do forno é controlada até 800°C, a um fluxo de N<sub>2</sub> igual a 15 NL/min. O teste é realizado sob carga de forma a se reproduzir a resistência mecânica a que o material metálico é submetido dentro do alto-forno. Esta carga é aplicada no topo da superfície da amostra por um pistão de grafite.

Os principais parâmetros obtidos pelos ensaios de amolecimento e fusão são listados a seguir. Estes parâmetros são diretamente relacionados aos fenômenos que acontecem no interior do forno.

- (Ts) – temperatura de amolecimento: correspondente ao instante em que a queda de pressão (delta P) atinge 200 mmH<sub>2</sub>O durante o aquecimento da amostra.
- (Te) – temperatura de fim de fusão da carga: na qual a perda de pressão (delta P) do gás redutor, após atingir seu ponto máximo, retorna a 200 mmH<sub>2</sub>O.
- (ΔT) – estimativa da espessura da zona coesiva: corresponde ao aumento de temperatura experimentado pela carga metálica na região de queda de pressão mais significativa do alto-forno (Te – Ts).
- (Delta Pmax) – queda máxima de pressão: é o valor máximo de queda de pressão do gás atingido durante o ensaio e mede a perda de carga no leito.
- (S) – área sob o pico de perda de pressão do gás: é um indicador da permeabilidade global do leito durante o ensaio (determinada no intervalo correspondente ao instante em que a queda de pressão atinge 200 mmH<sub>2</sub>O, passa por um máximo e novamente passa por 200 mmH<sub>2</sub>O).
- Grau de redução: corresponde ao grau de redução na respectiva temperatura, considerando a análise contínua dos gases de exaustão do forno.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Principais Características dos Materiais Avaliados

Na figura 1 são apresentados os resultados de análise granulométrica dos materiais.

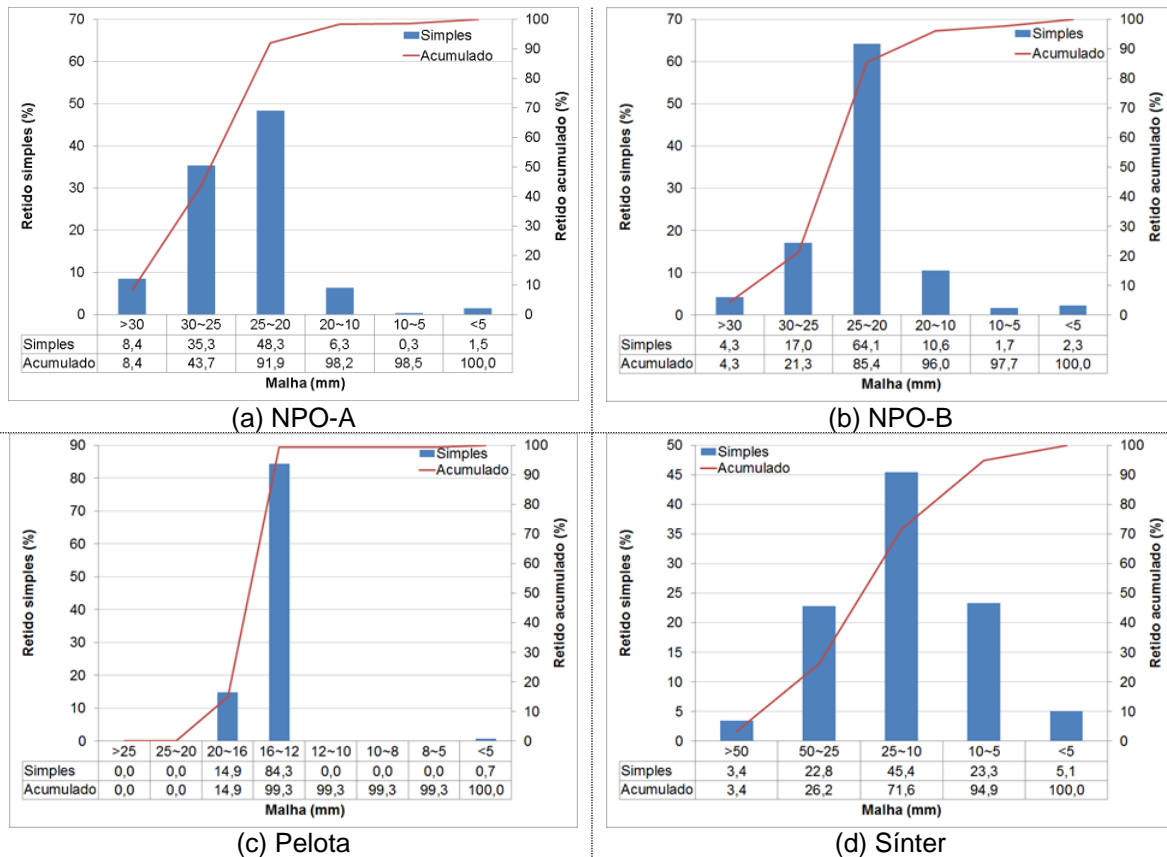


Figura 1. Distribuição granulométrica dos materiais.

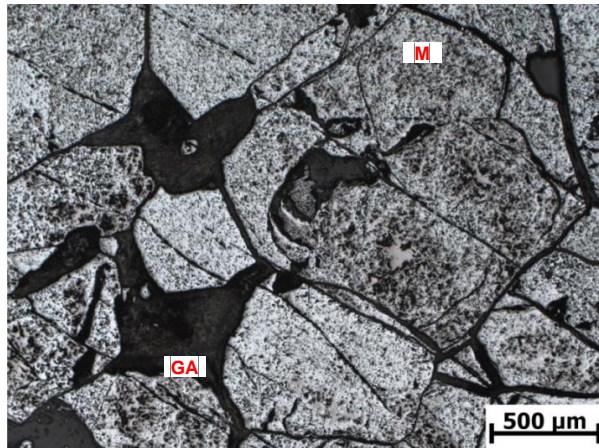
Os granulados estão concentrados entre 20 mm e 30 mm, enquanto que praticamente toda a pelota ficou entre 12 mm e 16 mm. A concentração destes materiais nessas faixas granulométricas mais grosseiras não é indicada, a menos que tenham excelente comportamento em termos de redutibilidade. O sínter é um material mais distribuído, com maior fração entre 10 mm e 25 mm, faixa indicada para esta carga metálica considerando o processo de redução.

Na tabela 4 são indicadas as fases que foram identificadas em DRX nos materiais analisados.

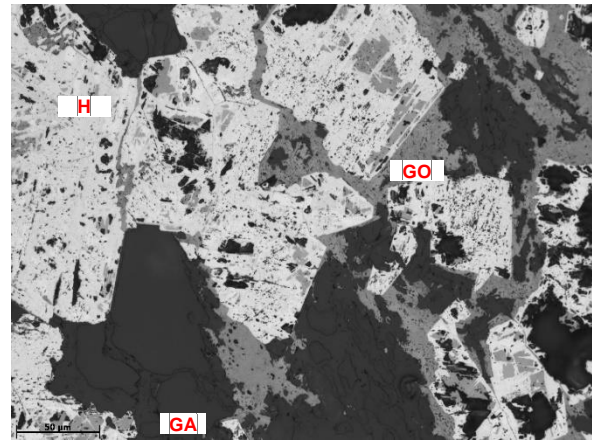
Tabela 4. Resultados em DRX

Mineral	Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	Goethita (FeO(OH))	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )	Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )	Caolinita (Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub> )	Cacioferrita	Silicato	Outros
NPO-A	x	x	x	x	x	x	-	-	x
NPO-B	x	x	x	x	x	-	-	-	-
Pelota	x	-	-	-	-	-	x	x	-
Sínter	x	x	-	-	-	-	x	x	-

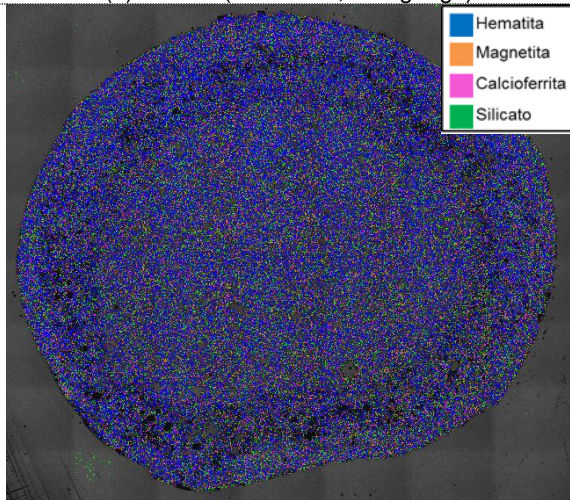
Na figura 2 são mostradas as características mineralógicas dos materiais, via microscópio óptico.



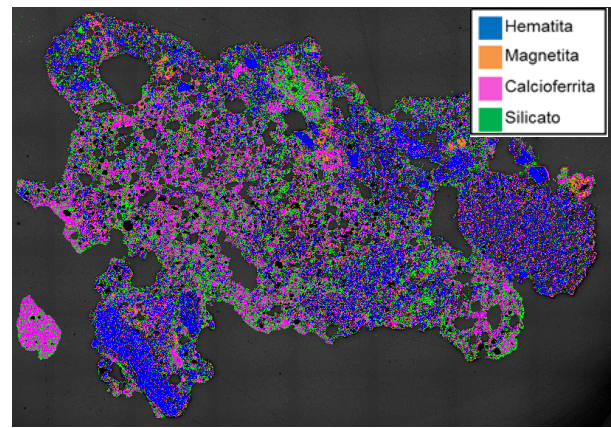
(a) NPO-A (M: martita; GA: ganga)



(b) NPO-B (H: hematita; GO: goetita; GA: ganga)



(c) Pelota



(d) Sínter

**Figura 2.** Microscopia óptica dos materiais: (a) NPO-A, (b) NPO-B, (c) Pelota e (d) Sínter.

O NPO-A apresentou quantidade significativa de magnetita, e a hematita indicada pela técnica de difratometria é, na realidade, martita, identificável somente via microscopia óptica. A martita (hematita com hábito de magnetita) é a estrutura encontrada no processo da transformação de magnetita para hematita. O NPO-A, apresentou grandes cristais porosos com morfologia granular. Os contatos entre esses cristais são bem definidos e são constituídos essencialmente por ganga. O NPO-B é fortemente goethítico, o que explica sua elevada perda por calcinação (PPC). A sílica tem como fonte mineral o quartzo. Na pelota se observa maciça presença de hematita e o restante distribuído entre calcioferrita e silicato. A característica macro do sínter revela um produto bastante adequado ao processo, com composição de um material bem aglomerado, com distribuição de poros esféricos por toda a matriz e considerável presença de calcioferritas, o que é desejável para boa redutibilidade, desde que seja do tipo acicular.

Os resultados dos ensaios mecânicos realizados são apresentados na tabela 5.

**Tabela 5.** Resultados dos ensaios mecânicos realizados nos materiais

Ensaio	NPO-A	NPO-B	Pelota	Sínter
Shatter (%)	96,80	95,25	-	87,98
Tumbler (%)	86,90	86,83	-	63,67
Compressão (daN)	-	-	350	-

Os minérios granulados apresentaram alta resistência ao impacto (*shatter*) e aos esforços de abrasividade (*tumbler*). A pelota se mostrou bastante resistente à compressão. O sinter apresentou elevada resistência à abrasão/*tumbler* e moderada resistência ao impacto/*shatter*, o que pode levar à geração de finos durante seu manuseio para o alto-forno.

Os resultados do ensaio de crepitação dos NPO's A e B são, respectivamente,  $5,0\% \pm 3,0\%$  e  $3,1\% \pm 0,8\%$ , com elevado desvio padrão para o primeiro. Embora seja comum associar a crepitação ao percentual de goethita, para estes dois minérios isto não ocorreu. Acredita-se que a maior crepitação do NPO-A esteja associada à dilatação anisotrópica dos (grandes) cristais de hematita. Já no NPO-B, sua elevada porosidade pode facilitar a saída do vapor d'água gerado, reduzindo a crepitação.

Para a pelota é importante avaliar o grau de inchamento, uma característica peculiar de extrema relevância para determinação da quantidade a ser utilizada no alto-forno. O valor encontrado (32,92%) é bem superior àquele desejado ( $< 18\%$ ), o que limitaria o seu uso a valores máximos de 15% da carga metálica.

Os índices de redutibilidade (RI) e de degradação após redução em baixa temperatura (RDI) são apresentados na tabela 6. Em termos de RI, se verifica o baixo desempenho do NPO-A e elevado do NPO-B, possivelmente função da mineralogia peculiar de cada um. O resultado da pelota surpreende pelo seu elevado valor, o que possivelmente está relacionado à sua distribuição de poros. O sinter apresentou desempenho razoável. É importante ressaltar que, apesar de amplamente utilizado, os resultados de redutibilidade não refletem completamente o comportamento da carga metálica no interior do alto-forno. Isto porque neste teste o material é avaliado à temperatura constante em  $900^{\circ}\text{C}$ , condição favorável para a redução, o que não necessariamente irá acontecer quando se tem variação da temperatura. Em outras palavras, um material que apresenta bom RI não necessariamente será bom para o alto-forno. Em função disso, os testes em A&F são mais adequados para se identificar o comportamento da carga metálica em termos de comportamento em redução.

**Tabela 6.** Resultados de redutibilidade (RI) e de degradação após redução (RDI), em %

%	NPO-A	NPO-B	Pelota	Sinter
RI	46,2	76,9	72,3	68,8
RDI <sub>+6,3</sub>	60,4	62,8	91,6	15,9
RDI <sub>-3,15</sub>	31,7	28,0	5,2	40,9
RDI <sub>-0,5</sub>	13,8	21,4	4,2	8,1

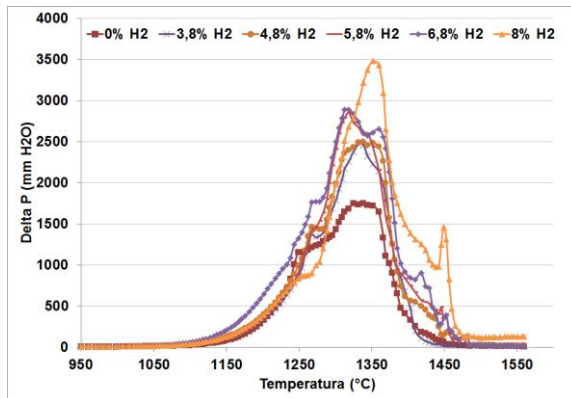
Em termos de RDI, destaca-se a elevada geração de finos dos NPO's e do sinter (elevado RDI<sub>-3,15</sub>), característica que afeta a permeabilidade do alto-forno, especialmente na região de carga seca (zona de preparação).

### 3.2 Ensaio em Amolecimento & Fusão

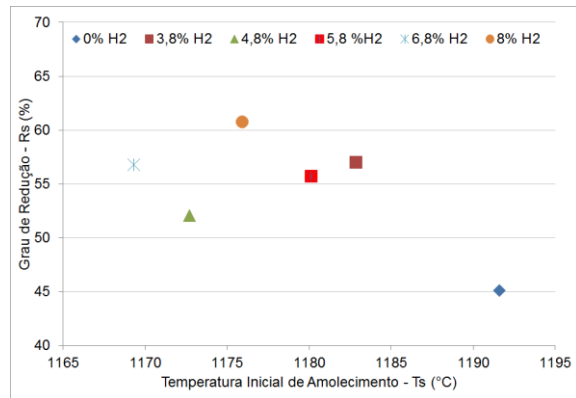
Os resultados em A&F são apresentados para cada tipo de material nas figuras 3 a 6, com destaque para as informações referentes a temperatura *versus* perda de pressão ( $\Delta P$ ) e grau de redução ao longo do aquecimento.

Para o NPO-A, à medida que se tem aumento do teor de hidrogênio no gás redutor, houve queda na temperatura de início de amolecimento e aumento na temperatura final de fusão (aumento do  $\Delta T$ ), que é indicativo de maior espessura da zona coesiva, com conseqüente aumento da resistência à passagem dos gases (S). Este

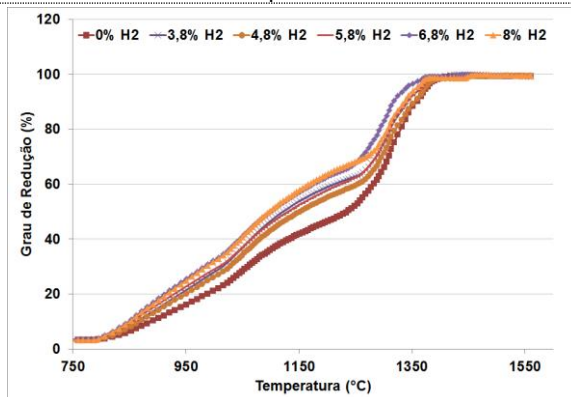
resultado é contrário ao esperado, já que o hidrogênio confere melhor difusividade ao gás, confirmado pelo melhor grau de redução. Por outro lado, o início de amolecimento mais cedo, associado ao maior grau de redução pode ser a explicação para o fenômeno, figuras 3 (a) a (c). Isto porque, para uma mesma temperatura, tem-se maior formação de líquidos no interior do material, comprometendo a permeabilidade aos gases redutores. Além disso, a presença de H<sub>2</sub> pode ter levado a um aumento na formação de líquidos com maior viscosidade (< FeO), obstruindo os poros e elevando a resistência da carga. Pela figura 3 (d) tem-se claramente a maior efetividade de redução pelo hidrogênio, já que a velocidade de redução é maior quando se aumenta o teor de H<sub>2</sub> no gás, especialmente para temperaturas mais baixas. Os resultados levam a crer que, para o NPO-A, as temperaturas que determinam a zona coesiva estão relacionadas à sua escória primária, muito rica em alumina (abaixando a temperatura de início de amolecimento). Além disso, a baixa relação SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pode elevar sua temperatura final de fusão, especialmente à medida que se tem o aumento do teor de H<sub>2</sub> (melhor redução da carga, ou seja, menor presença de FeO na escória).



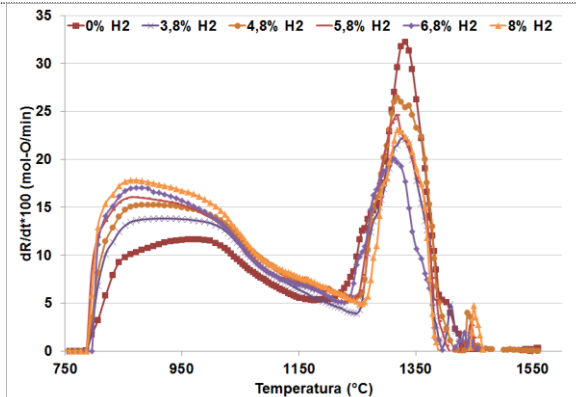
a) variação da perda de pressão em função da temperatura



b) relação entre o grau de redução e temperatura de início de amolecimento



c) grau de redução em função da temperatura



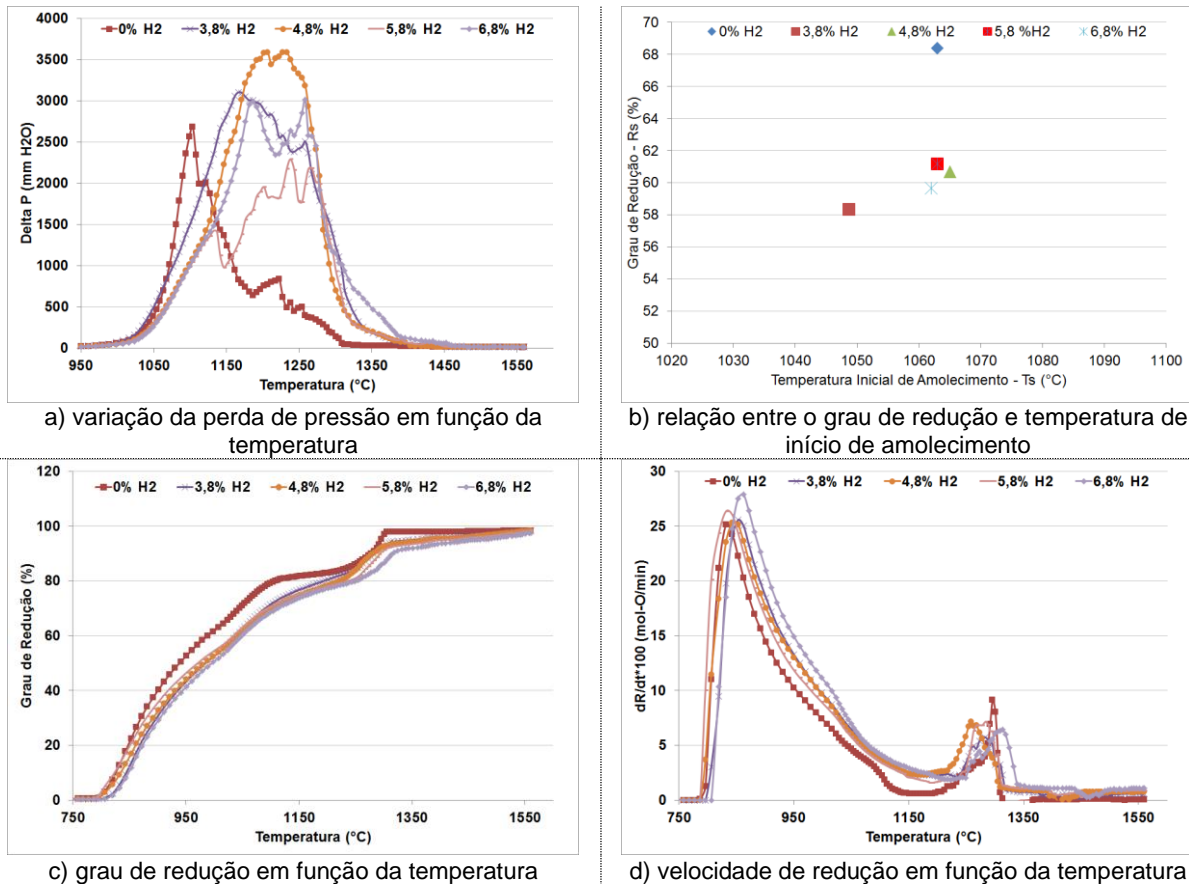
d) velocidade de redução em função da temperatura

**Figura 3.** Principais resultados em A&F para o NPO-A.

Os resultados do NPO-B indicaram que a presença do hidrogênio no gás redutor prejudicou o seu desempenho de redução, figura 4 (a). O mais alto grau de redução no início de amolecimento foi observado para a condição de 0% de H<sub>2</sub>, figura 4 (b). Em termos de velocidade de redução, o NPO-B apresentou um comportamento bastante favorável ao menor consumo de combustível, figura 4 (d). O fato de o material ter elevado PPC certamente influenciou neste resultado. A distribuição e tamanho dos poros gerados pela eliminação desta água pode ter favorecido a redução, ainda que o gás não tenha elevada difusividade. Para este material não foi



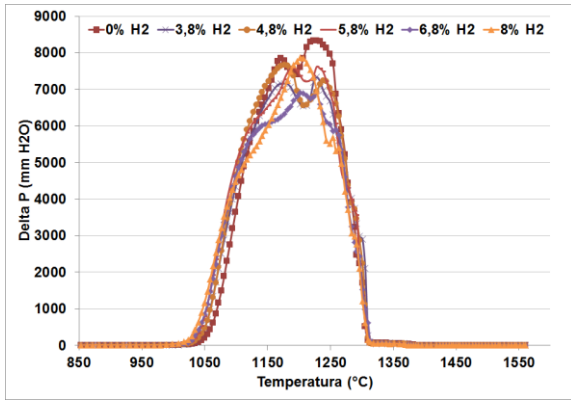
realizado o ensaio com 8% de H<sub>2</sub>. Isto porque os ensaios para maiores níveis de hidrogênio no gás estavam levando a grande fluidificação no cadinho e pouco gotejamento, comprometendo a integridade do forno.



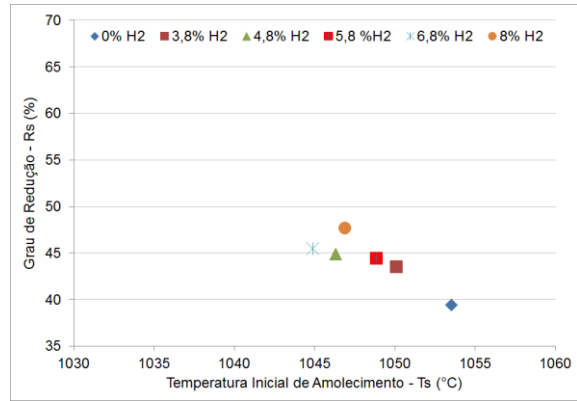
**Figura 4.** Principais resultados em A&F para o NPO-B.

Para a pelota houve pequena variação dos resultados de resistência à permeabilidade, com tendência de queda com o aumento de H<sub>2</sub>. Este fenômeno pode estar associado a esta pelota em particular, especialmente em função de seu tamanho mais avantajado, o que pode afetar o comportamento a alta temperatura. Em termos de grau de redução no início de amolecimento, figura 5 (b), embora tenha sido identificada ligeira melhora com o aumento do teor de hidrogênio, figura 5 (d), a pelota é pouco reduzida enquanto material sólido. Além disso, a redução do material líquido não sofreu influência do gás, o que indica ter acontecido com o coque sólido, o que pode elevar o consumo de combustível no alto-forno.

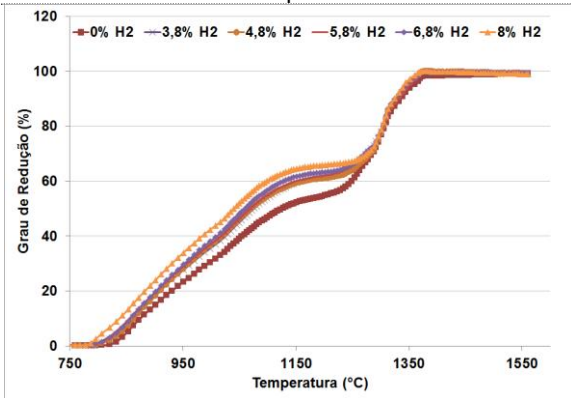
Para o sinter (figura 6), foi realizado o ensaio com uma condição diferenciada: 12,8% de H<sub>2</sub>. Todavia, em função de limitação do analisador de gás, não se teve informações referentes ao grau de redução da amostra para esta condição de teste. O comportamento de redução do sinter é excepcional quando comparado às demais cargas metálicas. E pode ser mais adequado quanto maior o teor de hidrogênio no gás redutor. Pelos resultados em A&F se observa estreitamento da zona coesiva com conseqüente redução da resistência à permeabilidade, o que reflete em maior produtividade do alto-forno. Além disso, melhora considerável da redutibilidade com conseqüente redução no consumo de combustíveis.



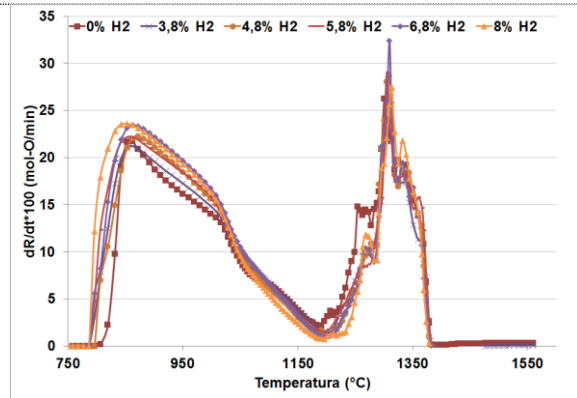
a) variação da perda de pressão em função da temperatura



b) relação entre o grau de redução e temperatura de início de amolecimento

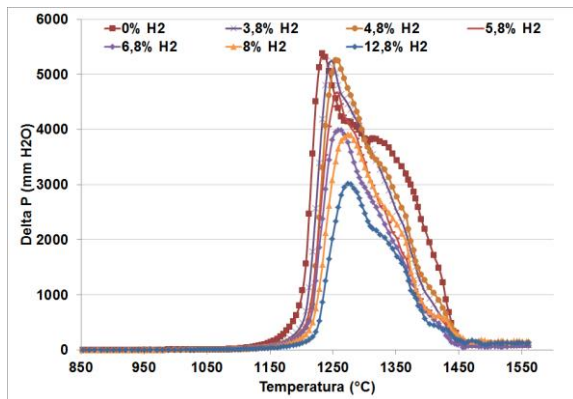


c) grau de redução em função da temperatura

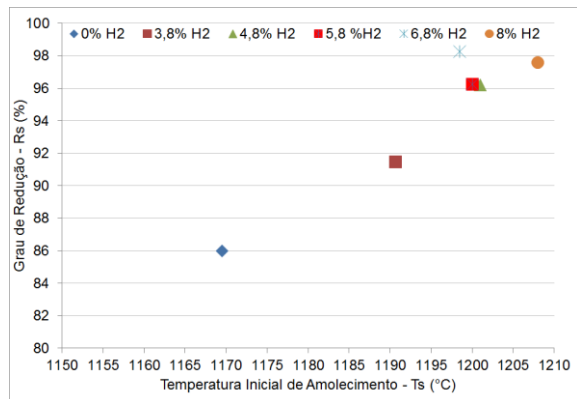


d) velocidade de redução em função da temperatura

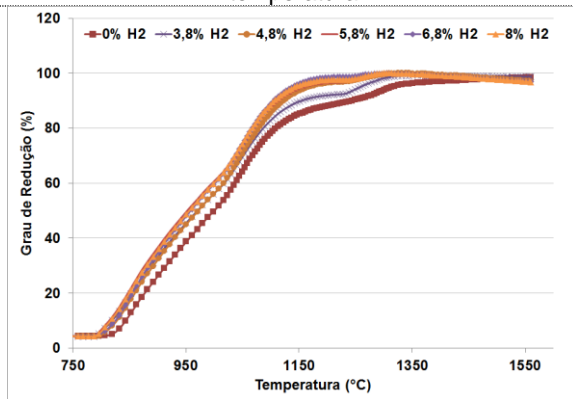
**Figura 5.** Principais resultados em A&F para a pelota.



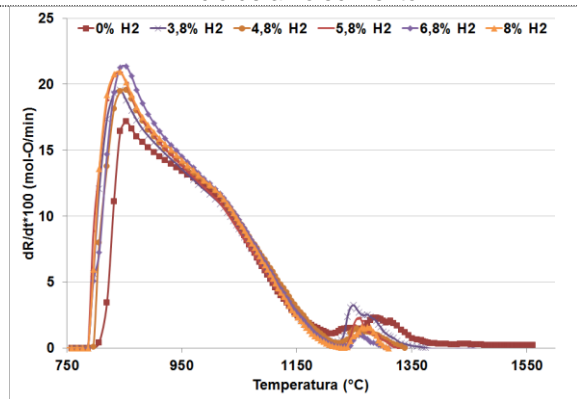
a) variação da perda de pressão em função da temperatura



b) relação entre o grau de redução e temperatura de início de amolecimento



c) grau de redução em função da temperatura



d) velocidade de redução em função da temperatura

**Figura 6.** Principais resultados em A&F para o sínter.

Pela figura 7 é possível observar graficamente os resultados que melhor traduzem o comportamento de cada material em A&F. Foram colocadas, de maneira conjunta, todas as cargas avaliadas com os diferentes teores de hidrogênio no gás redutor.

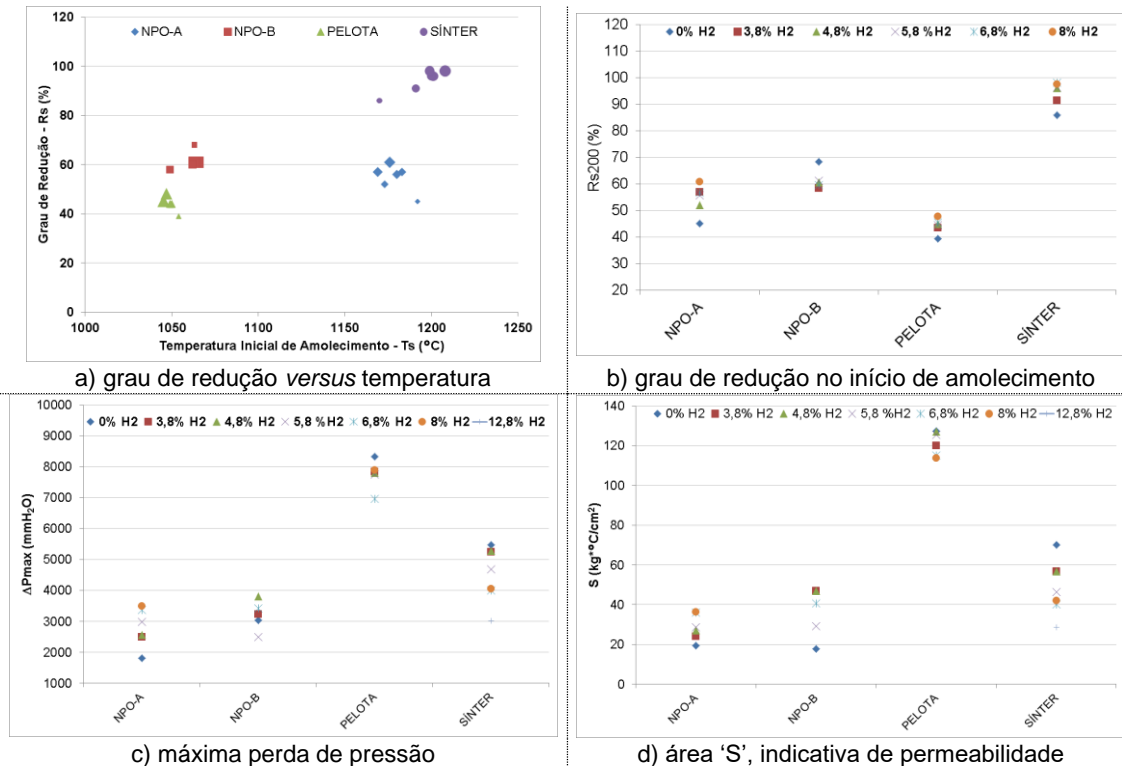


Figura 7. Consolidação dos principais resultados em A&F.

O sínter apresentou desempenho superior aos demais, com maior efeito da variação do hidrogênio no gás redutor. A pelota se posiciona na condição de mais baixo grau de redução no início do amolecimento, e, similar ao NPO-B, apresenta temperatura inicial de amolecimento muito baixa. Este último, contudo, apresenta melhor grau de redução quando comparado à pelota e ao NPO-A.

#### 4 CONCLUSÃO

Houve elevação do grau de redução da carga à medida que se aumentou o teor de hidrogênio, à exceção do NPO-B. Este minério apresentou surpreendente redutibilidade e a presença do hidrogênio no gás redutor prejudicou o seu desempenho, alargando a zona coesiva e aumentando a resistência à passagem dos gases. Este fato pode estar relacionado ao seu elevado PPC, que, após desidroxilação da goethita, pode ter afetado a distribuição e o tamanho dos poros. O NPO-A exibiu aumento de resistência à permeabilidade com maior teor de hidrogênio no gás redutor, função de seu amolecimento precoce, com conseqüente obstrução dos poros. A pelota apresentou modesta melhora em termos de redutibilidade, contudo, manteve elevada resistência à permeabilidade. O comportamento de redução do sínter foi excepcional, quando comparado às demais cargas. Além disso, maior teor de hidrogênio no gás redutor resultou em estreitamento da zona coesiva com conseqüente redução da resistência à permeabilidade, o que reflete em maior produtividade do alto-forno e melhora considerável da redutibilidade, e redução no consumo de combustíveis. Assim sendo, em altos-fornos que têm o sínter como carga metálica majoritária, maior teor de H<sub>2</sub> no gás redutor pode ser muito favorável ao processo.

## REFERÊNCIAS

- 1 SAITO, K. Recent Research & Development Topics of Iron-Making Technologies in NSSMC. Proceedings, 8<sup>th</sup> ICSTI 2018 (International Congress on Science and Technology of Ironmaking), Viena. pp. 1064-1070. 2018.
- 2 ARIYAMA, T.; SATO, M.; NOUCHI, T.; TAKAHASHI, K. Evolution of Blast Furnace Process toward Reductant Flexibility and Carbon Dioxide Mitigation in Steel Works. ISIJ International, Vol. 56, No. 10, pp. 1681-1696. 2016.
- 3 JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION. **JIS M 8711: Test Method for Determination of Shatter Strength of Iron Ore Sinter.** 1987.
- 4 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3271: Iron ores for blast furnace and direct reduction feedstocks - Determination of the tumble and abrasion indices.** 2015.
- 5 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4700: Iron ore pellets for blast furnace and direct reduction feedstocks - Determination of the crushing strength.** 2015.
- 6 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4696-1: Iron ores for blast furnace feedstocks - Determination of low-temperature reduction-disintegration indices by static method - Part 1: Reduction with CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>.** 2015.
- 7 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7215: Iron ores for blast furnace feedstocks - Determination of the reducibility by the final degree of reduction index.** 2015.
- 8 GANDRA, B. F.; MIRANDA, A. M.; JERÔNIMO, W. S. Avaliação de Amolecimento e Fusão de Carga Metálica na Usiminas. Contribuição Técnica ao 42º Seminário de Redução da ABM, Rio de Janeiro – Brasil. 2012.