

FLEXIBILIDADE DE MATÉRIAS-PRIMAS NO PROCESSO TECNORED

José Henrique Noldin Júnior¹

José Carlos D'Abreu²

Edmar Saul Marcheze³

Pedro Henrique Carpinetti Costa⁴

Resumo

Uma das principais características do processo TecnoRed é a sua flexibilidade no uso de matérias-primas não convencionais, como fonte de ferro e carbono combustível/reduzidor, para produção de ferro primário, incluindo a utilização dos resíduos sólidos gerados e/ou de terceiros. Esta característica do processo foi comprovada durante a fase de desenvolvimento, em planta piloto; será explorada na usina de demonstração industrial e deverá ser um dos principais alicerces de difusão da tecnologia a nível mundial. Este trabalho discute os principais aspectos relacionados à utilização de matérias-primas alternativas na fabricação de ferro primário via tecnologia TecnoRed.

Palavras-chave: TecnoRed; Flexibilidade; Matérias-primas; Auto-redução.

RAW MATERIAL FLEXIBILITY IN THE TECNORED PROCESS

Abstract

One of the main features of the TecnoRed ironmaking process is its ability to use non-conventional iron and carbon bearing raw materials such as low grade ores or steel plant solid residues in the production of primary iron. This characteristic of the process has been demonstrated during the stage of pilot plant development and shall be exploited in the first industrial unit as well as to a rapid and worldwide diffusion of the technology afterwards. In this work the main aspects related with the use of different raw materials in the process are discussed.

Key words: TecnoRed; Flexibility; Raw materials; Ironmaking; Self-reduction.

I INTRODUÇÃO

A produção mundial de ferro primário via alto-forno em 2005 chegou próxima à marca de 800 milhões de toneladas,⁽¹⁾ resultando em uma produção mundial de minério de ferro da ordem de 1,5 bilhões de toneladas e de carvão siderúrgico (coqueificável e não-coqueificável) de mais de 700 milhões de toneladas.

Para atender a esta demanda, ainda crescente por sinal, os reatores têm operado de acordo com práticas modernas visando alcançar índices de produção muito próximos às suas capacidades nominais ou, em muitas vezes, até acima. Todavia, este cenário levou a um aumento expressivo do preço internacional das matérias primas siderúrgicas clássicas, particularmente, após o ano 2000 quando a produção Chinesa passou a reger os principais movimentos do setor (Figura 1).

Este aumento de preço dos insumos elevou o custo de produção de ferro primário nas

usinas e ampliou significativamente a já conhecida dependência da agregação de valor após a etapa de redução para manter a competitividade dos produtores integrados. Ou seja, pode-se dizer que a etapa de redução clássica (via altos-fornos), se considerada como um negócio independente nas empresas, dificilmente sobreviveria no ambiente atual.

Este fator, entre outros, tem servido como força motriz para o desenvolvimento de tecnologias de redução que tenham baixo custo de investimento e operação e que permitam a utilização eficiente de matérias-primas não convencionais. Caso tenham êxito, estas tecnologias tem o potencial de:

- aumentar a oferta de matérias primas no mercado (redução de custo e maior disponibilidade local);
- reduzir o custo operacional de produção de ferro primário; e
- aumentar a utilização e longevidade das reservas atuais de minério e carvão.

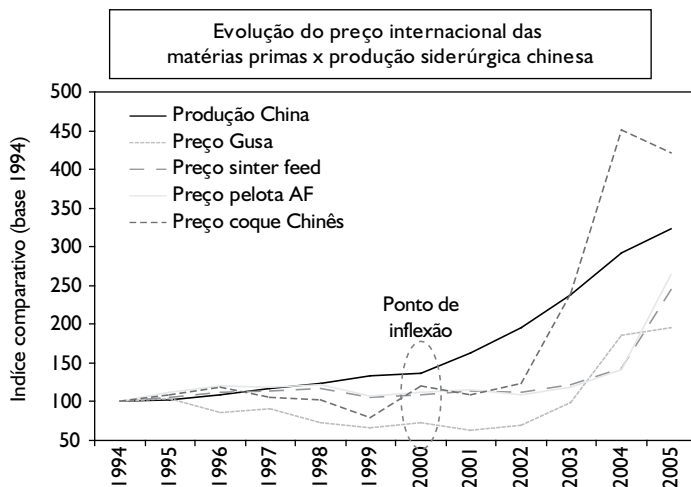
É neste contexto que a tecnologia brasileira TecnoRed se destaca, pois, contrariamente à tecnologia clássica, dispensa completamente o uso de matérias-primas nobres através da utilização de materiais não convencionais tais como minérios de baixo

¹ Tecno-Logos Desenvolvimento Tecnológico S/A (JJR@tecnored.com.br)

² Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio (dabreu@dcomm.puc-rio.br)

³ Tecno-Logos Desenvolvimento Tecnológico S/A (ESM@tecnored.com.br)

⁴ Tecno-Logos Desenvolvimento Tecnológico S/A (PHCC@tecnored.com.br)



Fonte: IISI, Tecnoled.

Figura 1. Preço de matérias-primas x produção siderúrgica na China.

teor, carvões não-coqueificáveis, biomassas e resíduos minero-metalúrgicos diversos.

2 PROCESSO TECNOLED

O processo Tecnoled é uma tecnologia emergente de produção de ferro primário, desenvolvida no Brasil, que se destaca pelo uso de um forno com geometria inovadora, que utiliza matérias-primas de baixo custo de forma limpa e altamente eficiente. Adicionalmente, o processo apresenta ainda a capacidade de processar uma carga integralmente constituída de resíduos próprios e de terceiros (rejeitos de lavra, finos de peneiramento, transporte, limpeza etc).

No processo são utilizados como carga aglomerados auto-redutores de cura a frio (dispensando fornos de queima), produzidos com finos de minério de ferro ou outras fontes de ferro (ex.: minérios de baixo teor e alta ganga), mais finos de alguma fonte de carbono (carvão mineral, coque verde de petróleo, carvão vegetal, resíduos carbonosos etc.). Estes materiais, misturados com fundentes e ligantes, são aglomerados em briquetadeiras ou em discos tradicionais de pelletização, na forma de briquetes e pelotas respectivamente, e em seguida curados e secados (Figura 2).

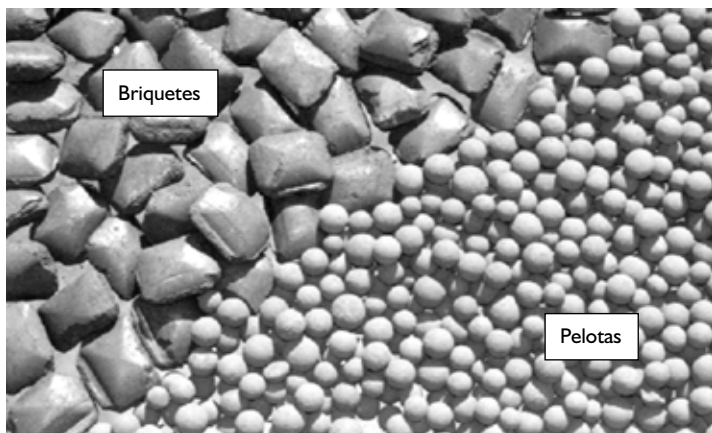


Figura 2. Briquetes e pelotas auto-redutores.

Em seguida, os aglomerados produzidos são reduzidos e fundidos num forno de geometria modificada e alta eficiência, o forno Tecnoled.⁽²⁻⁴⁾

Os produtos do processo são: metal líquido, escória e gás de topo, similares aos produzidos via alto-forno.

3 MATÉRIAS-PRIMAS PARA O PROCESSO TECNOLED

Assim como nos altos-fornos, as principais matérias-primas no processo Tecnoled são as unidades de ferro e carbono. Outros materiais utilizados, como fluxantes e ligantes, apesar da sua importância fundamental no processo, não apresentam impacto significativo no custo de produção e por isso não serão discutidos neste trabalho.

3.1 Unidades de Ferro

A tecnologia Tecnoled é extremamente flexível no uso de diferentes tipos de unidades de ferro como carga, pois, minérios ultra-finos (slimes), rejeitos de lavra e de barragens, minérios de baixo teor de ferro e alta ganga, carepas, pós e lamas siderúrgicas podem ser utilizados no processo. A primeira usina industrial de demonstração da tecnologia (em fase de implantação), por exemplo, utilizará pó de aciaria e carepa de laminação como componentes parciais da carga.⁽⁵⁾

A principal razão desta flexibilidade é a utilização dos aglomerados auto-redutores como carga, que exigem o uso de materiais com granulometria fina e são aglomerados a frio em discos de pelletização ou em máquinas de briquetar, sem necessidade de tratamentos em fornos de endurecimento ou grelhas de sinterização, logo sem os problemas inerentes a estes processos.

As seguintes matérias-primas merecem destaque no processo:

3.1.1 Fontes com baixo teor de ferro

Durante o desenvolvimento em planta piloto, minérios com teor de Ferro da ordem de 58% (ex.: cinzas de ustulação de pirita) foram utilizados com sucesso, enquanto nos ensaios de bancada foram testados com êxito materiais com teor de ferro total ainda menor, da ordem de 52% a 55% Fe_{tot} (mix de resíduos).

Devido às excelentes condições cinéticas presentes no interior dos aglomerados (uso de materiais finos, em contato íntimo e na ausência de atmosfera inerte), mesmo minérios ou resíduos com baixo teor e alta ganga são reduzidos rapidamente.

Obviamente a quantidade de escória gerada no processo aumenta com a diminuição do teor de ferro da carga devido à maior quantidade de ganga presente. As implicações diretas neste caso são:

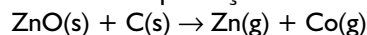
- aumento no consumo de combustível – a maior quantidade de ganga resulta em um aumento no *fuel-rate*. Todavia ressalta-se que o processo utiliza combustíveis não-convencionais, logo de baixo custo (conforme discutido adiante), o que deve ser considerado durante a análise de *trade-off* entre o *input* de minério vs. combustível; e
- menor produtividade do reator – devido à maior quantidade de escória e consequentemente da relação aglomerado/metálico, a produtividade volumétrica do reator diminui, o que não afeta a atratividade do processo que apresenta alta produtividade volumétrica (15 t/m³/dia a 18 t/m³/dia), especialmente se comparado aos processos tradicionais de produção de ferro primário (2 a 3 t/m³/dia).

3.1.2 Fontes com alto teor de zinco

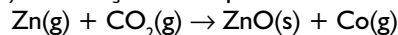
Muitos resíduos, gerados na fabricação de aço, apresentam elevados teores de zinco (lama de alto-forno, pó de aciaria elétrica etc.), e por isso não podem ser reciclados, satisfatoriamente, nos processos tradicionais, tanto nas usinas integradas quanto nas mini-usinas. Por este motivo, a capacidade do processo Tecnoled de utilizar materiais com elevado teor de zinco é de alto interesse para o setor.

No forno Tecnoled, o ZnO presente na carga reduz a zinco metálico e volatiliza-se em temperaturas relativamente baixas. Ao subir junto aos gases, o zinco reoxida-se na presença do CO₂ e é arrastado pelos gases da chaminé. O seguinte mecanismo é proposto:⁽⁶⁾

1) Redução do ZnO contido no aglomerado auto-redutor e vaporização do Zn:



2) Reoxidação do Zn para ZnO:



3) Possibilidades:

- a) ZnO puro deixa o forno ou,
- b) Na forma de ferritas de zinco (Me_xO_y, ZnO)

Este ZnO formado (puro ou na forma de ferrita), contrariamente ao alto-forno, não recircula dentro do reator, mas é levado para fora do forno junto com os outros finos naturalmente arrastados (briquete, de minério, de carvão, etc).

O ZnO contido nos gases de topo é então recuperado no sistema de limpeza de gases e comercializado junto à indústria deste elemento.

Esse comportamento particular do processo Tecnoled que permite a utilização de materiais com elevado teor de zinco, se deve ao projeto do reator (dimensões da chaminé, trajeto menor e velocidade adequada dos gases) e a temperatura controlada dos gases do processo.

Evidentemente que dependendo do teor inicial de ZnO nos resíduos utilizados, podem ser necessárias algumas etapas de recirculação dos finos capturados no sistema de limpeza dos gases, até atingir-se teores de ZnO suficientes para comercialização.

3.1.3 Fontes com alta alumina (Al₂O₃)

O forno Tecnoled permite a utilização de minérios com teor de Al₂O₃ sensivelmente maior do que o especificado em altos-fornos. No caso dos altos-fornos, a preocupação com o teor de Al₂O₃ deve-se às características da escória primária (temperatura e fluidez), e sua necessidade de percolar por entre os vários metros do leito na região de gotejamento, antes de formar a escória final.

No caso do forno Tecnoled, dois motivos tornam o processo muito mais flexível ao uso de materiais com alto teor de Al₂O₃:

- uso de aglomerados auto-fluxantes e auto-redutores – neste tipo de carga a escória primária é preparada externamente e formada com características muito próximas à escória final, ou seja, com características físico-químicas já determinadas; e
- baixa região de gotejamento – por ser um reator extremamente compacto, a distância que a escória primária deve percolar por entre o leito é muito pequena, da ordem de centímetros. A escória primária praticamente se forma acima da camada de escória final.

3.1.4 Fontes com alto teor de fósforo (P)

Assim como nos altos-fornos, as condições de funcionamento do forno Tecnoled implicam que todo o fósforo carregado no processo seja incorporado ao metal. Este fator, no entanto, não inviabiliza a utilização de minérios ricos em fósforo, pois atualmente é possível a adoção de tecnologias simples e de baixo custo para remoção externa do fósforo do metal.

Por esse motivo, acredita-se que o uso de minérios com alto teor de fósforo, como carga no forno Tecnoled, combinado ao uso de combustíveis de baixo custo, possa ser interessante em vários casos, após uma análise técnico-econômica-ambiental das variáveis envolvidas.

3.2 Unidades de Carbono

A tecnologia Tecnoled utiliza duas fontes distintas de carbono na produção de ferro primário,⁽⁴⁾ a saber: carbono redutor e carbono combustível (Figura 3).

3.2.1 Redutor

O agente redutor apresenta granulometria fina (100% < 1 mm) e é misturado aos outros constituintes (finos das fontes de

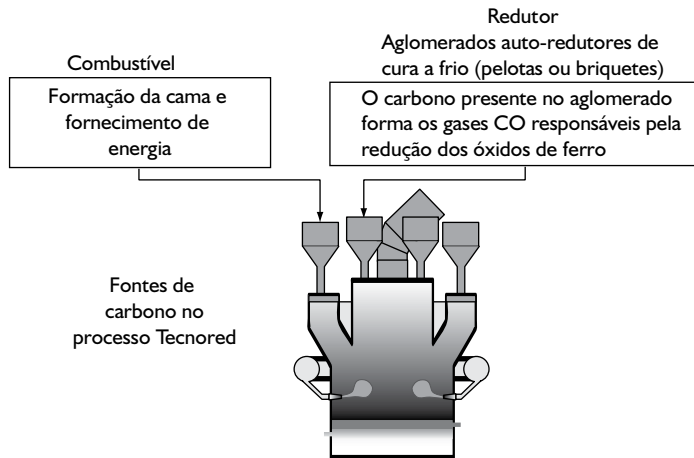


Figura 3. Uso de unidades de carbono no processo Tecored.

ferro, fluxantes e ligantes) durante a preparação dos aglomerados auto-redutores.

A quantidade de redutor adicionada à mistura é definida pela relação C/F (Carbono por Óxidos ferrosos presentes), normalmente em quantidade suficiente para promover a completa redução no estado sólido dos óxidos ferrosos presentes, num modelo de redução sólido-sólido via intermediários gasosos que dispensa ou sofre pouca influência da atmosfera exterior ao aglomerado, demandando apenas o aporte térmico necessário (Figura 4).

No interior do aglomerado, após atingir a temperatura de reatividade, o carbono sólido presente gaseifica-se de acordo com a reação de Boudouard ($\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$), gerando os gases redutores que são responsáveis pela redução dos óxidos em um ambiente livre de gases inertes.

Assim, virtualmente qualquer material fino e com elevado teor de carbono (> 50%) pode ser utilizado como agente redutor nos aglomerados auto-redutores devido às ótimas condições cinéticas presentes no processo.

Esta possibilidade aumenta sobremaneira a flexibilidade e vantagens econômicas e ambientais do processo, pois permite inclusive o uso de diversos sub-produtos ricos em carbono, que atualmente não encontram uma destinação adequada.

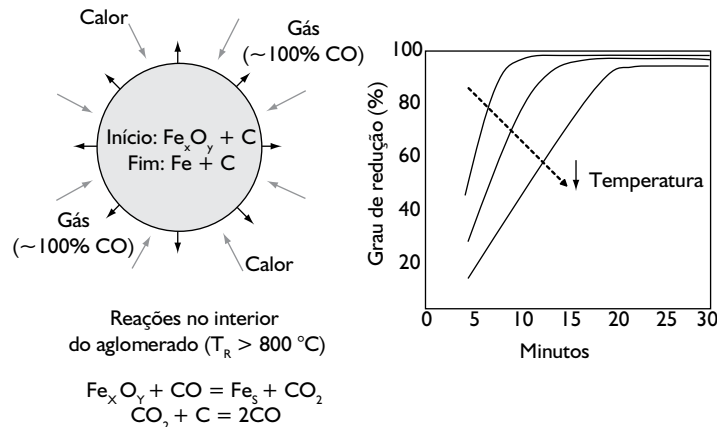


Figura 4. Uso do carbono redutor no processo.

3.2.2 Combustível

A segunda fonte de carbono é o combustível sólido, que atua como agente térmico no processo. O material, bitolado, é carregado através de alimentadores laterais diretamente na cuba inferior do forno, formando a cama de combustível e, depois de queimado, fornecendo energia ao processo.

O processo Tecored apresenta alta eficiência energética. Gases e carga trocam energia em contra-corrente e com o conceito dos alimentadores laterais, evita-se a ocorrência da reação de gaseificação de carbono na cuba superior do forno ($\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$), com conseqüente economia de combustível e melhor distribuição térmica. A energia utilizada no processo é gerada em duas etapas, primeiro pela queima direta do combustível no *raceway* (queima primária) e depois pela pós-combustão do gás CO oriundo das regiões inferiores do reator (queima secundária).

Deve-se ressaltar que o material utilizado como combustível no forno Tecored deve criar a permeabilidade necessária para um bom fluxo das fases gasosa e líquida dentro do reator. Para isso, o combustível deve apresentar no fim dos alimentadores laterais, após passar pelo processo de charificação (Figura 5), um esqueleto com resistência suficiente para suportar a carga acima da cama formada na cuba inferior.

Adicionalmente, o *char* formado deve ter reatividade adequada para promover tanto uma boa temperatura adiabática como uma boa geometria de chama quando queimado, e por fim

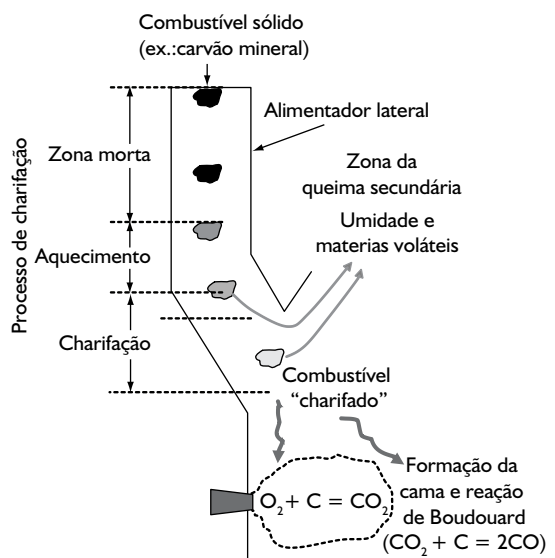


Figura 5. Alimentação lateral de combustível no forno Tecored.

garantir a relação CO/CO₂ desejada no topo da cama de combustível.

Contudo, deve-se ressaltar que o peso total da carga imposta à cama de combustível no forno Tecnoled é bem menor que em um alto-forno devido à alta produtividade volumétrica do processo. Logo, as exigências mecânicas são proporcionalmente menores, dispensando combustíveis de elevadas propriedades mecânicas exigidas pelos processos tradicionais, que requerem combustíveis coqueificados, emitindo substâncias extremamente nocivas durante o processo de fabricação.

Esta característica, ou seja, uso de um forno compacto, é uma das principais razões que explicam a habilidade do forno para dispensar o uso de coque metalúrgico e permitir o uso de combustíveis sólidos não-convencionais e de baixo custo, tais como carvões minerais diretamente, sem necessidade de coqueificação. Neste caso, os HCTs liberados são queimados dentro do reator, com aproveitamento da energia gerada e a consequente economia de combustível.

Evidentemente, o uso ou não de um determinado combustível deve ser definido após uma avaliação sobre o custo do insumo frente à quantidade consumida por tonelada de produto, volume de escória gerado, friabilidade, necessidade de dessulfuração, etc.

Portanto, os combustíveis sólidos com potencial de uso no processo Tecnoled podem ser selecionados entre várias alternativas de baixo custo e ampla oferta, a serem usados integralmente ou em misturas, ratificando a extrema flexibilidade e garantindo a competitividade da tecnologia, conforme mostrado na Tabela I.

4 ASPECTOS ECONÔMICOS

Conforme demonstrado até aqui, a alta flexibilidade do processo permite o uso de vários materiais como matéria-prima do processo, particularmente sob o ponto de vista técnico. Desta maneira, acredita-se que a decisão de utilização ou não de certo material acabe sendo função em

Tabela I. Combustíveis alternativos com potencial de uso no forno Tecnoled.

Classe	Tipos de combustíveis
Carvão mineral não-coqueificável	Carvão semi-antracítico Briquetes de finos de carvão
Coque verde de petróleo (CVP)	CVP (tipo “esponja”) Briquetes de finos de CVP
Coque metalúrgico	Coque chinês de baixo-resistência Semi-coque (coque Indiano de alto-cinza) Briquetes de finos de coque
Biomassas	Madeira seca (até 20% do total) Madeira anidra (tiço) Carvão vegetal Briquetes de finos de carvão vegetal
Resíduos	Pedaços de pneu (até 20% do total) Resíduos automotivos (até 20% do total)

muitos casos apenas de uma análise econômica, ambiental e/ou estratégica.

Do ponto de vista econômico, obviamente que uma maior flexibilidade no uso de matérias-primas traz significativas vantagens, pois permite a escolha entre várias opções, escapando assim do mercado *spot* e de inevitáveis sazonalidades de fornecimento de determinado material.

Com os atuais preços de mercado de minério de ferro (SFF) e coque siderúrgico, por exemplo, acredita-se que a tecnologia Tecnoled possa produzir gusa no Brasil com um custo entre US\$ 70,00 e US\$ 100,00, menor do que a tecnologia tradicional.

5 CONCLUSÕES

O processo Tecnoled apresenta uma extrema flexibilidade de uso de matérias-primas alternativas na fabricação de ferro primário, tanto como fonte de ferro como de carbono redutor/combustível.

A partir da utilização de minérios de mais baixo teor de ferro, além de resíduos minero-metalúrgicos, a tecnologia Tecnoled auxilia no aumento da vida útil das reservas existentes de minério de ferro e carvão metalúrgico que, nos ritmos atuais de consumo e crescimento, sofrem reais riscos de exaustão em poucas gerações.

Por fim, ressalta-se que matérias-primas antes consideradas como rejeitos, poderão ser utilizadas melhorando assim a performance técnica, ambiental e econômica do setor.

REFERÊNCIAS

- 1 IISI. IISI **Crude steel production**. Disponível em: <<http://www.worldsteel.org/>>. Acesso em: 19 jan. 2006.
- 2 NOLDIN JUNIOR, J. H.; D'ABREU, J. C.; CONTRUCCI, M.; MEIJER, K. **Tecnoled process: optimum ironmaking process for the Europe Union**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE & EXHIBITION ON NEW DEVELOPMENTS IN METALLURGICAL PROCESS TECHNOLOGY, 2., 2004, Riva del Garda. Milano: Associazione Italiana di Metallurgia, 2004. 1 CD.

- 3 CONTRUCCI, M. **Tecnored process industrial plant in construction**. In: BEYOND THE BLAST FURNACE CONFERENCE, 2000, Atlanta, EUA. Atlanta: Gorham, 2000.
- 4 NOLDIN JUNIOR, J. H.; CONTRUCCI, M. A.; D'ABREU, J. C.; JACOMINI, N. Fuel flexibility in the Tecnored process. In: INTERNATIONAL MEETING ON IRONMAKING, 2., 2004, Vitória. **Anais...** São Paulo: ABM, 2004. p. 201-12.
- 5 NOLDIN JUNIOR, J. H.; CONTRUCCI, M. A.; COSTA, P. H. C.; MARCHEZE, E. S.; D'ABREU, J. C.; CELLISSEN, T.; MEIJER, K.; COX, I. J. **Tecnored: The first full scale furnace**. In: AISTECH 2005, Charlotte, EUA. Pittsburgh: AIST, 2005. 1 CD.
- 6 NOLDIN JUNIOR, J. H.; BENTES, M. A. G.; D'ABREU, J. C.; ROSSI, L. A. LEITE, A. B. Recycling of CST by-products by Tecnored ironmaking. In: INTERNATIONAL MEETING ON IRONMAKING, 2., 2004, Vitória. **Anais...** São Paulo: ABM, 2004. p. 457-67.

Recebido em: 20/01/07

Aceito em: 22/05/07

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 61., 2006, Rio de Janeiro. São Paulo: ABM, 2006.