

MODELAGEM FÍSICA DA FORMAÇÃO DE VÓRTICE DURANTE O VAZAMENTO DO AÇO DE UMA PANELA

Sandro de Souza Santos ¹
 Henrique Silva Furtado ²
 Carlos Antônio da Silva ³
 Itavahn Alves da Silva ⁴
 Varadarajan Seshadri ⁵

Resumo

Um modelo em acrílico de uma panela (315 toneladas, ArcelorMittal Tubarão), escala 1:7, foi utilizado para simular as condições de vazamento do aço, e avaliar as condições de surgimento do vórtice. O momento da inserção do vórtice no canal de vazamento foi determinado através de sensores foto-elétricos e o material residual foi pesado de modo a se avaliar o rendimento metálico. A influência do tipo de fluxo residual imposto pelas rotas normais de processamento, tais como RH e IRUT, da vazão de drenagem, além de dispositivos antivórtice foi avaliada. O fluxo residual devido ao processamento em RH e IRUT, bem como o nível inicial de aço na panela não afetaram os resultados. O Volume Residual se mostrou função apenas da vazão. Verificou-se que o fluxo de aço era interrompido pela capacidade de abastecimento radial do canal de saída. Como tal, a utilização de quebradores de vórtice se mostrou contra prodente. Simulações realizadas induzindo um fluxo rotacional no fluido de forma a aumentar a propensão ao vórtice permitiram confirmar que a injeção de gás pelo fundo da panela e a utilização de barreiras próximas à região de vazamento contribuem para aumentar o rendimento.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Vórtice; Painéis; Simulação física.

PHYSICAL MODELING OF VORTEX FORMATION DURING LADLE DRAINAGE

Abstract

A 1:7 scale plexiglas model of a steelmaking ladle (315 tons, ArcelorMittalTubarão) was built in order to assess the conditions of vortex formation during the final stages of draining. The vortex was detected by a photo-electric sensor and the mass of residual liquid inside the ladle was evaluated after weighing. The influence of the type of residual flow, as dictated by routes of processing such as: RH degasser, IRUT reactor, as well as the drainage flow rate, in addition to anti-vortex devices, was assessed. Residual flow due to RH or IRUT processing as well as the initial level of liquid did not affect the results. The mass of residual liquid at vortex onset was influenced by the flow rate only. At the final stages of drainage, the liquid surface collapse was dictated by the bottom ladle capacity of supplying liquid in the radial direction to the outlet. As a consequence vortex breakers were found deleterious under these set of conditions. A rotational flow was induced in order to increase the likelihood of vortex formation. In this case gas injection through the pouring nozzle, vortex breakers, sloped bottoms have been found effective.

Key words: Continuous casting; Ladle; Simulation; Vortex.

1 INTRODUÇÃO

A Indústria Siderúrgica vem focando o seu desenvolvimento na melhoria da qualidade dos materiais produzidos de forma a atender a restrições mais rígidas. No entanto o custo de fabricação é fator que não pode ser desprezado e,

neste contexto, a Aciaria torna-se de grande valor potencial de estudo, uma vez que, além de agregar cerca de 30% ao custo do produto acabado, ainda pode ser responsável por diversos defeitos observados junto ao cliente final.

¹Engenheiro Metalurgista, MSc, Membro da ABM, Gerente de Área de Produção de Placas da ArcelorMittal Tubarão, Serra, ES, Brasil
 ArcelorMittal Tubarão, Av. Brigadeiro Eduardo Gomes, 930, Jardim Limoeiro, 29163-970, Serra ES. sandro.santos@arcelormittal.com

²Engenheiro Metalurgista, MSc, Membro da ABM, Especialista de Controle Técnico do Aço da ArcelorMittal Tubarão, Serra, ES, Brasil
 ArcelorMittal Tubarão, Av. Brigadeiro Eduardo Gomes, 930, Jardim Limoeiro, 29163-970, Serra ES. henrique.furtado@arcelormittal.com

³Engenheiro Metalurgista, MSc, PhD, Membro da ABM, Professor DEMET/UFOP Departamento de Metalurgia,
 Escola de Minas, UFOP, Campus do Morro do Cruzeiro S/N, 35400-000, Ouro Preto, MG. casilva@em.ufop.br

⁴Engenheiro Metalurgista, MSc, PhD, Membro da ABM, Professor DEMET/UFOP Departamento de Metalurgia,
 Escola de Minas, UFOP, Campus do Morro do Cruzeiro S/N, 35400-000, Ouro Preto, MG. itavahn@demet.em.ufop.br

⁵Engenheiro Metalurgista, Dr. Ing, Membro da ABM, Professor DEMET/UFMG, Departamento de Metalurgia - EEUFGM,
 Rua Espírito Santo, 35, 30160-30, Belo Horizonte, MG seshadri@demet.ufmg.br

Na ArcelorMittal Tubarão o aço percorre um circuito compreendendo o Convertedor de Sopro Combinado – Painela – Estação de Desgaseificação à vácuo (*Vacuum Degassing Ruhrstahl-Heraeus* ou RH) ou Estação de tratamento de painela (*Injection Refining Up Temperature* ou IRUT) – Lingotamento Contínuo.

Durante o processo, quando o aço líquido é transferido desde um reator a outro, o eventual surgimento do vórtice proporciona a passagem de escória de um reator àquele imediatamente subsequente.

Existem vários trabalhos desenvolvidos com o objetivo de aprofundar os conhecimentos dos mecanismos da formação dos vórtices. Em geral as técnicas envolvem modelagem a frio, utilizando água, óleos ou metais de baixo ponto de fusão, como em Suh et al.,⁽¹⁾ Chiapparoli, Sylvestre e Madías,⁽²⁾ Pimenta, Valadares e Belligoli,⁽³⁾ Sankaranarayanan e Guthrie,⁽⁴⁾ Piva et al.,⁽⁵⁾ Hammerschmid et al.,⁽⁶⁾ Ajmani e Choudhary,⁽⁷⁾ Heaslip et al.⁽⁸⁾ e/ou matemática como em Davila et al.⁽⁹⁾ Parametros de estudo incluem por exemplo a razão entre diâmetros da painela e furo, a posição do furo, a presença de fluxo residual, a utilização de inibidores de vortex, o nível inicial de líquido, a presença de fases simulando a escória e a vazão. Na maior parte dos casos se reporta a altura crítica de formação de vortex, tendo sido esta determinada visualmente, por meio de sensores foto-elétricos e aferição contínua de massa. Os resultados são em geral concordantes, excetos aqueles provindos de Davila et al.⁽⁹⁾ Entretanto a aplicabilidade direta dos valores encontrados na prática industrial é questionável pois os mesmo se mostram sensíveis a configuração geométrica e parâmetros operacionais.

O presente trabalho tem como objetivo estudar os mecanismos de formação do vórtice durante a drenagem do aço da painela para o distribuidor do lingotamento contínuo com foco na redução da sobra de aço na painela e minimização da passagem de escória da painela para o distribuidor. São analisadas condições específicas da ArcelorMittal Tubarão, mas as tendências são de aplicabilidade geral.

2 METODOLOGIA

De forma a simular as condições propostas, foi utilizado um modelo de painela em acrílico, construído na escala 1:7, representado na Figura 1, e operado de acordo com o critério de similaridade de Froude.⁽¹⁰⁾



Figura 1. Foto da montagem experimental

Na prática industrial corrente na ArcelorMittal Tubarão as taxas de lingotamento variam de 8 t/min a 12 t/min. Assim, as faixas de vazão no modelo variaram de 9 L/min a 13 L/min, de acordo com o critério citado. A Tabela 1 apresenta as principais características do modelo em comparação à painela utilizada no processo industrial.

Tabela 1. Características da painela – protótipo x modelo

Descrição	Protótipo	Modelo
Volume de líquido (m ³)	45,00	0,131
Diâmetro interno do topo da painela (m)	4,20	0,60
Diâmetro interno da base da painela (m)	3,65	0,52
Altura da painela (m)	4,40	0,63
Diâmetro do furo de vazamento (m)	0,080	0,0114

A variável resposta utilizada para caracterizar a incidência do vórtice no processo foi o volume de líquido retido no modelo, após a detecção, pela célula fotoelétrica, da passagem de ar pelo canal de vazamento. Durante a operação do modelo, um sensor recebe a luz que atravessa o fluxo de água, emitida da fonte posicionada no lado oposto do tubo e registra um determinado valor de tensão. Quando do início da passagem de ar (presença do Vórtice), o valor medido sofre uma alteração. Desta forma, é possível registrar o início da formação do vórtice. A Figura 2 apresenta uma curva característica da leitura do sensor fotoelétrico.

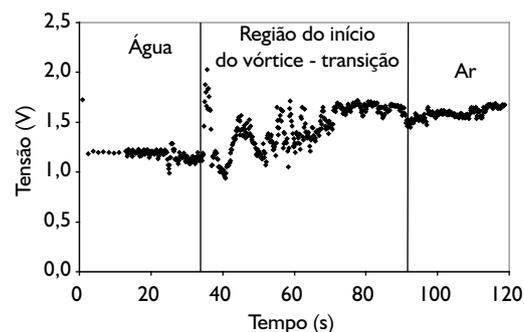


Figura 2. Curva característica de resposta do sensor fotoelétrico.

A formação do vórtice é dependente tanto de condições geométricas particulares junto ao canal de vazamento, quanto do campo de velocidades, pré-existentes ao início do vazamento. A pré-existência de fluxos rotacionais aumenta a incidência do vórtice. Desta forma os experimentos foram divididos em duas etapas: Avaliação nas condições do processo industrial e avaliação através da indução de campo rotacional.

2.1 Campo Inicial de Velocidades

Na rota normal o aço é distribuído ao Lingotamento Contínuo a partir de panela advinda do IRUT ou RH. Cada um destes reatores induz um padrão de fluxo e uma propensão específica a vórtice. Estes padrões foram simulados em modelos em escala dos reatores, que incluíam o modelo de panela em estudo.

Para comparar a influência dos fluxos mencionados acima foi realizado um experimento a partir do repouso absoluto, ou seja, após 30 minutos de espera entre o fim do enchimento da panela e o início do teste. Nesta situação não foi verificado movimento residual do líquido, decorrente do enchimento da panela.

Além do exposto acima, para amplificar a possibilidade de formação de vórtice durante a drenagem foram realizados testes adicionais com alimentação tangencial da água junto à parede da panela, com entrada a 30° em relação à horizontal. A panela não se enchia totalmente, em média a 1/3 da capacidade durante cerca 3~4 minutos. Estes valores correspondem a uma vazão média de 14 L/min e uma velocidade média de 0,2 m/s.

2.2. Dispositivos Anti-vórtice

Diversas condições foram simuladas: Barreiras próximas ao furo de vazamento (Figura 3) citadas por Davila et al.,⁽⁹⁾ Hammerschimid et al.⁽⁶⁾ e Ajmani e Choudhary,⁽⁷⁾ injeção de ar através de agulhas posicionadas na região de vazamento sugeridas por Lange, Claes e Joly,⁽¹¹⁾ a utilização de um fundo falso (Figura 4) criado a partir da otimização do fundo estudado por Heaslip et al.,⁽⁸⁾ além da interação das condições acima como, por exemplo: Fundo falso com injeção de ar e Barreiras com injeção de ar.

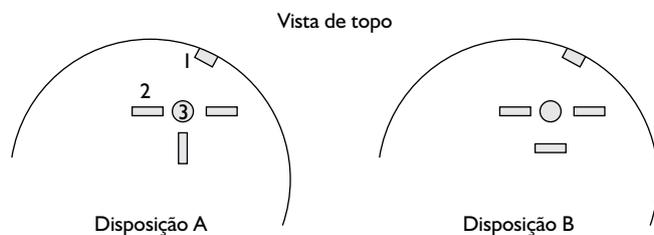


Figura 3. Anteparos anti-vórtice disposição A e B. 1) Bloco vertical junto à parede; 2) Bloco horizontal no fundo da panela; 3) Furo de vazamento

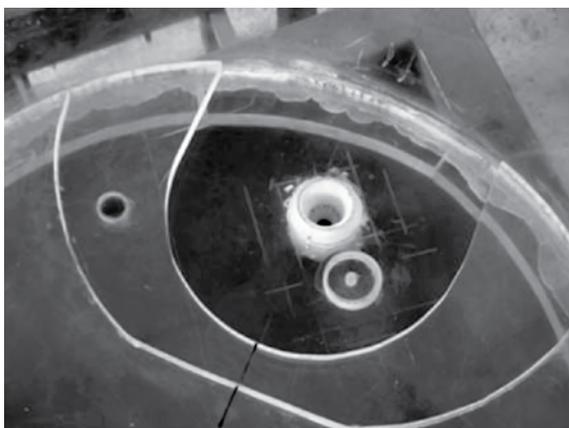


Figura 4. Fundo falso para reduzir volume residual.

3 RESULTADOS

Inicialmente foram realizados experimentos com dois níveis de fluido, equivalentes a 315 t e 200 t de aço em uma panela industrial. As vazões foram escolhidas de acordo com o já citado adimensional de Froude, de modo a retratar taxas de lingotamento de 8 t/min a 12 t/min.

Foram realizadas simulações considerando os diferentes tipos de fluxo residuais possíveis na rota de processamento da ArcelorMittal Tubarão, para um mesmo nível inicial de 132 litros (315t). A Figura 5 apresenta uma comparação entre resultados correspondentes às vazões de misturamento (vazão de gás pela lança do reator) de 20 L/min e 40 L/min em um modelo de reator IRUT. A Figura 6 compara os resultados relativos ao modelo do IRUT em uma vazão de 40 L/min e a circulação no sentido horário em um reator RH.

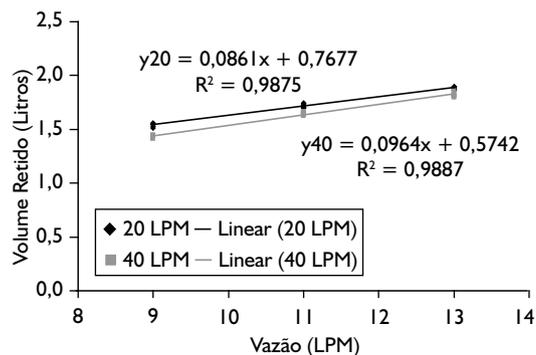


Figura 5. Comportamento do Volume de Líquido Residual para dois Níveis de Vazão de Misturamento no IRUT.

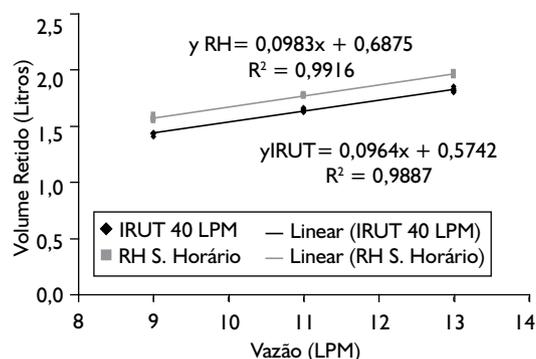


Figura 6. Comportamento do volume de líquido residual para circulação do RH sentido horário e IRUT com vazão de misturamento de 40 L/min.

De acordo com o encontrado não existe diferença significativa entre os resultados referentes a RH em diferentes sentidos de circulação, IRUT com vazões diferentes de misturamento, nível inicial de líquido na panela, comparados

com a situação em que a drenagem começa do repouso (após 30 minutos de espera). Por repouso entende-se a ausência de movimentação do fluido ao início de vazamento: 30 minutos de espera foram julgados suficiente para a dissipação de qualquer movimento residual provocado pela operação de enchimento da panela. Os tempos de drenagem parecem ser longos o suficiente para eliminar qualquer diferença advinda do campo inicial de velocidades e somente a vazão de lingotamento influencia o processo.

Foram posicionados anteparos na região do canal de saída com o objetivo de reduzir o volume residual na panela. A Figura 7 apresenta uma comparação entre três situações do RH: com circulação no sentido horário e 315 t: sem anteparos, com anteparos tipo A (todos os três na direção radial) e com anteparos tipo B. De acordo com os resultados, nas condições experimentais estudadas, anteparos não são efetivos na redução do volume residual na panela e, inclusive, a presença dos mesmos pode aumentar o residual de líquido. Esta tendência reforça o argumento que, nas experiências relatadas até aqui, nos estágios finais de drenagem o mecanismo seria controlado pela capacidade de abastecimento ao furo de vazamento; os anteparos seriam obstáculos ao abastecimento. De fato, o posicionamento dos obstáculos de acordo com o esquema A (todos na direção radial) se mostra substancialmente menos deletério que o posicionamento de acordo com o esquema B.

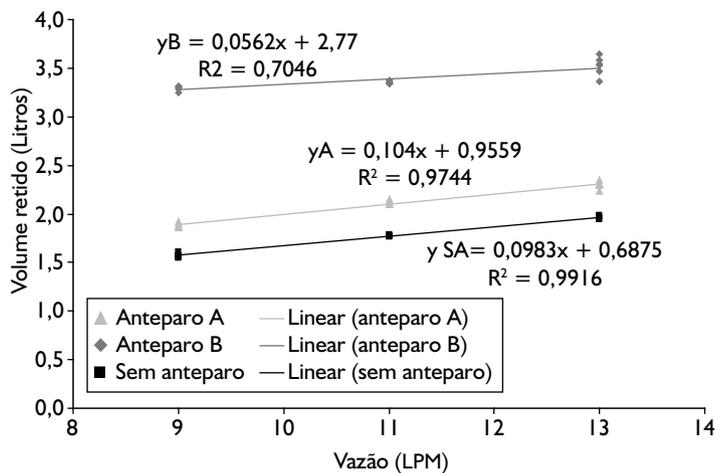


Figura 7. Comportamento do volume de líquido residual para situações do RH com circulação no sentido horário com 132 litros (315 t): sem Anteparos, com anteparos tipo A e com anteparos tipo B.

Realizadas as simulações referentes a condições típicas de processo, claramente desfavoráveis à formação de vórtices, foram realizadas avaliações com campo rotacional forçado, ou seja, alimentação da água realizada tangencialmente conforme detalhado na seção 2.1. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos com a utilização da injeção de ar na região do canal de vazamento. Como esperado a introdução do fluxo tangencial residual levou a uma aumento significativo (cerca de 300%) da quantidade de material retido na panela. A injeção de gás pelo bloco da válvula contribui para reduzir, consideravelmente, estas perdas; como sugere a Figura 9 as perdas podem ser reduzidas à metade.

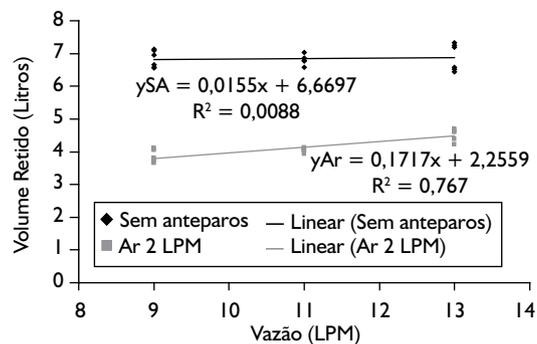


Figura 8. Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial sem Anteparos e com Injeção de Ar a 2 L/min.

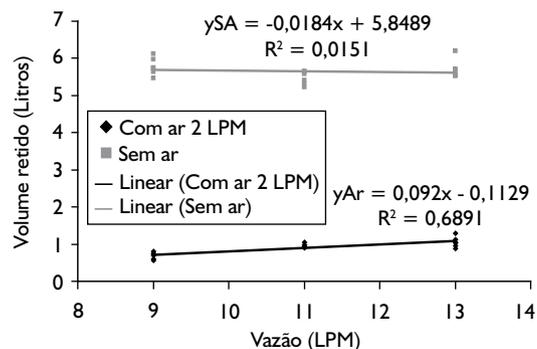


Figura 9. Comportamento do volume de líquido residual para alimentação tangencial, fundo falso com injeção de ar 2 L/min e sem injeção de ar.

Avaliou-se também a possibilidade de utilização conjunta de fundo falso e injeção de ar (Figura 9). A combinação parece efetiva, notando-se que o emprego do fundo falso acoplado à injeção de ar reduz o material retido ao nível de 1 litro. Ressalta-se, entretanto, que a utilização do fundo falso poderia implicar em redução do volume útil da panela em cerca de 7 toneladas.

4 CONCLUSÕES

Os resultados das simulações realizadas nas condições de processo da ArcelorMittal Tubarão mostraram que são compatíveis com drenagem de líquido no sentido radial, com abastecimento provindo do fundo da panela. Portanto com a ausência de vórtice. Estes sugerem ainda, que o volume residual possui uma relação direta com a vazão de esgotamento, tendência confirmada, por exemplo, pelos estudos de Heaslip et al.⁽⁸⁾ Os experimentos de Davila et al.⁽⁹⁾ mostram resultados divergentes.

Pôde-se verificar que quando a panela é alimentada tangencialmente, o que provoca um movimento rotacional, o volume residual da mesma tende a aumentar em cerca de 400%. Sugere-se que este aumento do movimento rotacional aumenta o potencial para o surgimento do vórtice.

Os diversos dispositivos anti-vórtice apresentados neste trabalho mostraram-se eficientes na redução do volume residual na panela, mostrando em certos casos, que o volume residual era compatível à uma condição com ausência de vórtice, sugerindo que a eliminação completa do mesmo foi conseguida.

Agradecimentos

À ArcelorMittal Tubarão pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 SUH, J.W.; PARK, J.; KIM, H.; LEE, Z.H. Suppression of the vortex in ladle by static magnetic field. **ISIJ International**, v. 41, n. 7, p. 689-95, 2001.
- 2 CHIAPPAROLI, W.; SYLVESTRE, S.; MADÍAS, J. First experiences with a steel ladle water model. In: SEMINARIO DE ACERIA DE THE INSTITUTO ARGENTINO DE SIDERURGIA, 13.; SEMINARIO DE REDUCCIÓN,3.; ENCUENTRO DE LA SECCIÓN ARGENTINA DE LA ISS, 3., 2001, Buenos Aires, Argentina. Buenos Aires, IAS, 2001. p. 689-96.
- 3 PIMENTA, H.P.; VALADARES, C.A.; BELLIGOLI, G.C.D. Estudo da passagem de escória na etapa de vazamento de aço panela/distribuidor. In: IAS STEELMAKING SEMINAR, 17., 1997, Buenos Aires, Argentina. Buenos Aires: IAS, [199-?]. p. 199-207.
- 4 SANKARANARAYANAN, R.; GUTHRIE, R.I.L. Slag entrainment through a "funnel" vortex during ladle teeming operations. In: STEELMAKING CONFERENCE, 1992, Ontario, Canada. **Proceedings...** Montreal: The Metallurgical Society of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy, [s.d.]. p. 655-64.
- 5 PIVA, M.; IGLESIAS, M.; BISSIO, P.; CALVO, A. Experiments on vortex funnel formation during drainage. **Physica A**, v. 329, n. 1-2, p. 1-6, Nov. 2003.
- 6 HAMMERSCHMID, P.; TACKE, K.H.; POPPER, H.; WEBER, L.; DUBKE, M.; SCHWERDTFERGER, K., Vortex formation during drainage of metallurgical vessels. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 11, n. 6, p. 332-9, Aug. 1984.
- 7 AJMANI, S.K.; CHOUDHARY, S.K. Cold model study of vortexing in ladle and Tundish. **TATA Search**, p. 103-9, 2002.
- 8 HEASLIP, L.J.; DORRICO, J.D.; RICHAUD, J.; ROGLER, J.P.; ALVES, W.A. Yield Improvement through enhanced ladle bottom design (ELBY). In: SEMINÁRIO DE ACIARIA – INTERNACIONAL, 37., 2006, Porto Alegre, RS. **Anais...** São Paulo: ABM, 2006. p. 515-24.
- 9 DAVILA, O.; FERRO, L.; MORALES, R.D.; DEMEDICES, G.L.; PEREZ, P.R. Physical model and mathematical simulations of ladle draining operations. In: AISTECH CONFERENCE PROCEEDINGS, 2005, Charlotte, NC. Warrendale, PA: Association for Iron & Steel Technology, 2005. v. 1, p. 873-99.
- 10 SZEKELY, J.; THEMELIS, N.J. Rate phenomena in process metallurgy. New York: John Wiley & Sons, 197. p. 784.
- 11 LANGE, M.; CLAES, J.; JOLY, A. Clean steel block – new developments towards clean steel. **Revue de Metallurgie. Cahiers D'Informations Techniques**, v. 100, n. 6, p. 577-82, June 2003.

Recebido em: 20/03/08

Aceito em: 12/06/08

Proveniente de: SEMINÁRIO DE ACIARIA - INTERNACIONAL, 38., 2007, Belo Horizonte, MG. São Paulo: ABM, 2007.