

ESTUDO DO VAZAMENTO NO CANAL DO CONVERTEDOR LD E AVALIAÇÃO DO DESGASTE E FRICÇÃO AO LONGO DE CORRIDAS¹

Breno Totti Maia²
Carlos Eduardo Passagli Barra³
Thiago Augusto Ávila⁴

Resumo

O tempo de vazamento de aço no convertedor LD é determinante no consumo de ligas e representa considerável importância no tempo total do processo de fabricação do aço. O projeto de uma geometria do furo de corrida do convertedor baseado nos princípios de fenômenos de transporte e escoamento de aço permite estimar os tempos de vazamento e otimizar esta etapa do processo. Um modelo baseado na equação de Bernoulli e o uso de recursos de softwares e planilhas, bem como análise dos dados experimentais, auxiliam e permitem o cálculo do tempo de vazamento, a avaliação dos fatores de fricção, rugosidade e desgaste do furo de corrida. A mudança de parâmetros geométricos como diâmetro, posicionamento e acabamento da entrada do furo de corrida geram alterações no tempo de vazamento. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é projetar um novo furo de corrida, que forneça tempos de vazamento compreendidos entre 180 e 240 segundos.

Palavras-chave: Vazamento de aço; Furo de corrida; Equação de Bernoulli.

STUDY OF TAP IN BOF'S TAPHOLE AND VALUATION OF WEAR AND FRICTION DURING CASTING

Abstract

The time of steel tap is very important in alloys yield and total time process of steelmaking. The project of new geometry to BOF's taphole based in Transport Phenomena theory and steel flow, allows to get the time of tap and optimization this part of process. One model based in Bernoulli equation using of software tools and experimental data, helps and allows the calculus of tapping time, valuation of wear and friction factor. The change of geometric parameters, as diameter, position and inlet's profile, modify time of steel tap. The objective of this work is to project a new design of taphole then supply time tapping between 180 and 240 seconds.

Key words: Steel tap; Taphole; Bernoulli equation.

¹ Trabalho apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS

² Sócio da ABM, Engenheiro Metalurgista, Assessor de Processos Aciaria e Laminação – Gerdau Barão de Cocais.

³ Sócio da ABM, Aluno de Mestrado em Engenharia Metalúrgica da UFMG.

⁴ Sócio da ABM, Aluno de graduação em Engenharia Metalúrgica da UFMG.

1 INTRODUÇÃO

A fabricação de aço via convertedor LD aprimorou-se ao longo dos anos em função da tecnologia, melhoria dos procedimentos operacionais e equipamentos, bem como um maior conhecimento e entendimento do processo. Assim, ganhos em rendimentos de ligas, produtividade, eficiência e aumento da vida útil dos equipamentos tornaram-se imprescindíveis e produtos de um trabalho contínuo de melhorias.

Para diminuir o consumo de ligas e também do tempo, valiosos em aspectos produtivos, a etapa de vazamento de aço do convertedor é de suma importância.

O tempo de vazamento é determinante durante a fase de adição de ligas na panela ⁽¹⁾, pois o mesmo deve permanecer estável ao longo das corridas e dentro de uma faixa de tempo, que permita adições por etapas garantindo a incorporação destas no aço e não na escória.

O vazamento de aço é feito através do furo de corrida que consiste atualmente em um duto de trecho reto com dimensões definidas, localizado na parte superior do convertedor, denominada cone. O vazamento de aço pelo convertedor é complexo, pois a geometria do furo de corrida não é constante ao longo de sua vida e ainda está submetido a fatores de desgaste ⁽²⁾.

A vida útil do furo de corrida deve ser a maior possível, possibilitando uma diminuição dos custos de manutenção do mesmo. Uma geometria capaz de manter um desgaste mais homogêneo pode prolongar a vida do furo de corrida, um tempo de vazamento estável e predeterminado durante a vida do furo, bem como inibir formação de vórtex, prevenindo o arraste de escória para o furo de corrida.

As regiões onde há uma mudança brusca de geometria estão sujeitas a concentração de tensões; portanto, uma geometria suavizada diminui esta concentração, reduzindo assim o efeito desta sobre essas regiões ⁽³⁾. O alívio das tensões pode prolongar a vida do equipamento, reduzindo o efeito do desgaste.

O desgaste no furo de corrida se dá pelos seguintes mecanismos; oxidação, corrosão (ataque por escória), erosão (vazamento de aço) e choque térmico ⁽³⁾.

A geometria do convertedor também pode influenciar no vazamento ⁽²⁾. Logo esta deve sempre manter um nível de fluido acima do furo de corrida, que por sua vez deve estar situado em um ponto de máxima profundidade do convertedor, durante os maiores ângulos de basculamento. As dimensões do furo de corrida também são importantes e o mesmo deve estar devidamente projetado.

Walker, Kemeny e Jones ⁽¹⁾ relataram a importância de manutenção para garantir uma geometria estável do convertedor pela possibilidade de formação de poços no convertedor devido ao ilhamento do furo de corrida, conforme mostra a figura 1.

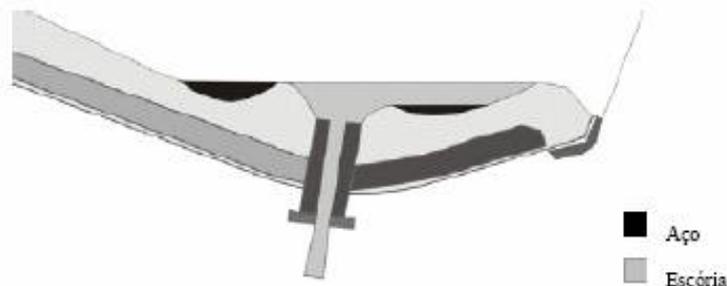


Figura 1. Ilhamento do furo de corrida

Estes poços podem reter uma quantidade significativa de aço e permitir a passagem prematura de escória no furo de corrida, bem como aumentar a perda metálica.

Outros aspectos consideráveis no convertedor são as características de escoamento e regime de trabalho. Escoamentos com movimento irregular dos elementos de volume do fluido e velocidades variáveis com o tempo são caracterizados como escoamento turbulento ⁽⁴⁾. Estas características de escoamento são observadas no convertedor durante o vazamento de aço.

No presente trabalho, estudou-se o vazamento do convertedor LD da Gerdau Barão de Cocais, visando-se projetar uma geometria do furo de corrida que produza tempos de vazamentos compreendidos de 180 a 240 segundos. Para tal projeto, conceitos de Fenômenos de Transporte foram imprescindíveis, visto que a geometria do furo de corrida influencia na vazão de aço.

2 METODOLOGIA

O tempo de vazamento do convertedor LD da Gerdau Barão de Cocais deve estar compreendido de 180 a 240 segundos, ao longo da vida do furo de corrida. A figura abaixo ilustra os tempos de vazamento durante a vida de um furo.

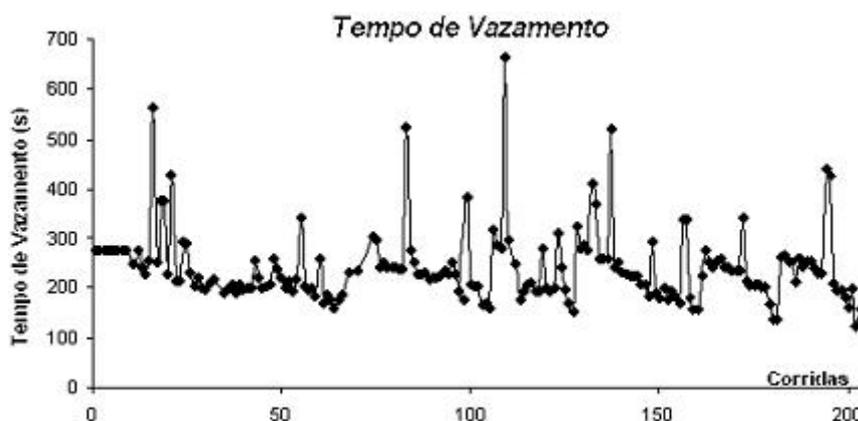


Figura 2. Instabilidade no tempo de Vazamento ao longo da vida do furo.

Pode-se notar na Figura 2 a instabilidade do tempo e o efeito do desgaste ao longo da vida do furo, que dura por volta de 200 corridas com reparos intermediários.

2.1 Características do Escoamento

A simples observação visual fornece informações importantes quanto ao tipo de escoamento. A condição de turbulência pode ser avaliada quanto à natureza filiforme do jato. Assim, pela análise em questão, o escoamento de aço demonstrara a diversidade de movimentos irregulares das partículas do fluido em forma de um jato dispersado, característico de escoamento turbulento.

2.2 Cálculos Matemáticos

Levando em consideração os conceitos de Fenômenos de Transporte e as condições de escoamento, pode-se estabelecer os cálculos das vazões de aço no furo de corrida. Sendo assim considere o sistema mostrado na Figura 3.

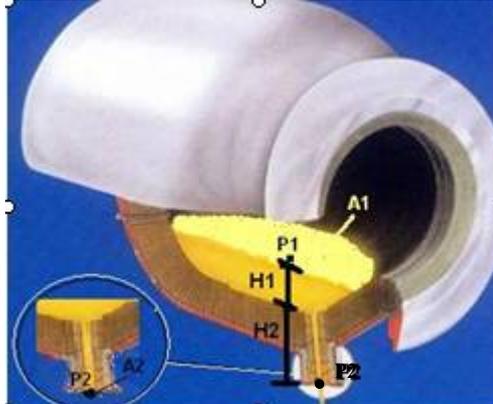


Figura 3. Ilustração do Convertedor

A equação de Bernoulli é estabelecida a partir do balanço global de energia e considera as perdas por fricção e tipo de escoamento. Assim por Bernoulli:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + g(\Delta H) + \left(\frac{\bar{V}_2^2}{2\beta_2} - \frac{\bar{V}_1^2}{2\beta_1} \right) + E_f = 0 \quad (1)$$

ΔP	Diferença de Pressão entre os ponto 1 e 2
ρ	Densidade do Fluido
g	Constante gravitacional 9,8 m/s ²
\bar{V}_2	Velocidade média no ponto 2
\bar{V}_1	Velocidade média no ponto 1
β	1 para escoamento turbulento e 1/2 para laminar
ΔH	Diferença de Altura
E_f	Forças de fricção

Considerando perdas devido à presença de uma contração, pode-se escrever:

$$E_f = \frac{1}{2} e_f \bar{V}_{duto}^2 \quad (2)$$

sendo que, $e_f = 0,45(1 - \alpha)$

(3)

Na equação (3) o fator α é dado pela razão entre as áreas A_2/A_1 . Sendo A_1 muito maior do que a área A_2 , o fator α é aproximadamente igual à zero. Logo, considerando nenhum acabamento na contração, $e_f = 0,45$, portanto, $E_f = 0,225V^2$. As perdas devido à seção reta são avaliadas pela equação:

$$E_f = 2f_{duto} \left(\frac{L_{duto}}{D} \right) \bar{V}_{duto}^2 \quad (4)$$

Onde L , D , ϵ e μ são o comprimento, diâmetro, rugosidade do duto e a viscosidade do aço, respectivamente, enquanto que f_{duto} é o fator de fricção dado pela equação;

$$f_{duto} = \left(-3,6 \log \left(\left(\frac{\varepsilon}{\frac{D_{duto}}{3,7}} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{\frac{D_{duto} \bar{V}_{duto} \rho}{\mu}} \right) \right)^{-2}$$

(5)

Para o caso de contração com acabamento, o valor de e_f é uma fração do valor de e_f da quina viva, conforme mostrado na Figura 4. Logo, para os cálculos serão testados os acabamentos ilustrados na Figura 4(a), quina viva e 4(c) quina chanfrada.

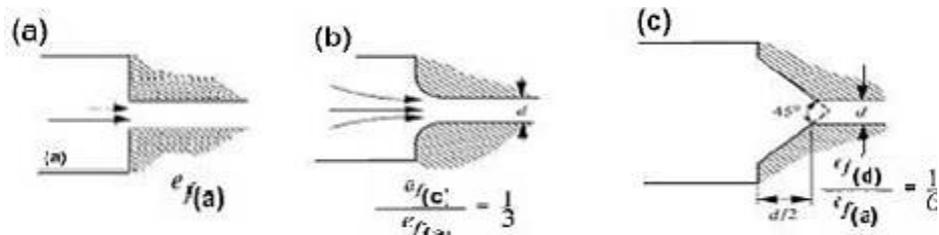


Figura 4. Valores de e_f para o tipo de acabamento da contração ⁽⁴⁾

A diferença de pressão entre os pontos P1 e P2 é zero e as velocidades podem ser relacionadas pela equação $A_1 \bar{V}_1 = A_2 \bar{V}_2$. Como, $A_1 \gg A_2 \Rightarrow \bar{V}_2 \ll \bar{V}_1$. Toda altura será considerada contendo apenas aço, desprezando a espessura da camada de escória que, além de pequena, não é constante durante o vazamento. A altura do nível de aço depende do ângulo em que se encontra o convertedor, que por sua vez se altera durante o vazamento. A fim de se obter uma equação que forneça o valor da altura H1 (Figura 3 - altura do nível de aço até a entrada do furo de corrida), o software Autocad foi utilizado. Desenhando-se o equipamento e girando-o por ângulos conhecidos, uma linha que passa pela boca do convertedor e paralela a horizontal foi traçada e, para cada ângulo, a altura da linha até o furo foi medida como ilustrado na Figura 5(a). Assim, pode-se plotar um gráfico de ângulo de basculamento do convertedor x altura do nível de aço acima do furo, conforme a Figura 5b) e obter, através de ajuste de curva, uma equação que define uma função entre as variáveis.

A altura dada por H2, apresentada na Figura 3, desnível entre a entrada e saída do furo na vertical, é obtida considerando que o furo de corrida está posicionado em 90° em relação ao ângulo de basculamento, que é medido com referência na vertical. Portanto, $H2 = L_{dut} \cdot \cos(\theta + 90)$, sendo θ o ângulo de basculamento.

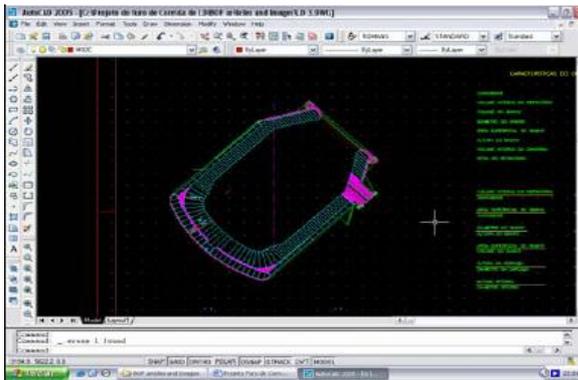


Figura 5(a). Desenho no Autocad

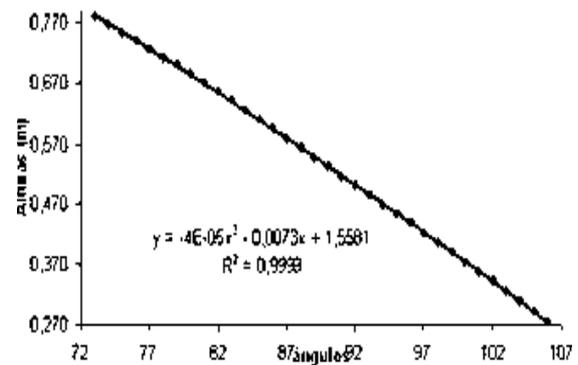


Figura 5(b). regressão polinomial 2º

Logo, a equação (1) de Bernoulli pode ser escrita considerando

$$\left(\frac{\bar{V}_2^2}{2\beta_2} - \frac{\bar{V}_1^2}{2\beta_1} \right) \approx \frac{\bar{V}_2^2}{2\beta_2}$$

e rearranjando, obtém-se a seguinte expressão:

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{g(4E - 5\theta^2 + 0,0073\theta + 1,5581) + |L_{duto} \cos(\theta + 90)|}{0,225 + 2f_{duto} \left(\frac{L_{duto}}{D} \right)}} \quad (6)$$

Através das equações (5) e (6), pode-se, por método iterativo, encontrar o fator de fricção e a velocidade média. Recordando, que a equação (6) permite o cálculo da velocidade média para o perfil de quina viva mostrado na Figura 4(a). Para os demais perfis de acabamento da contração deve-se multiplicar o valor 0,225 pelos valores dados pela razão entre o perfil “quina viva” e o modelo de acabamento desejado, que são mostrados na Figura 4.

O valor da rugosidade foi obtido através dos cálculos com conhecimento do tempo e carga vazada. Os ângulos e os tempos de permanência em cada ângulo são exportados da tela do supervisor do LD para uma planilha e em seguida são efetuados os cálculos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Rugosidade do Furo de Corrida

O furo de corrida da Gerdau é constituído de manilhas de magnésia-carbono e sua rugosidade inicial é muito pequena, devido ao processo de usinagem a que estas são submetidas. Com a exposição das manilhas ao vazamento do aço, choque térmico e ataque da escória, a rugosidade das manilhas altera ao longo das corridas. O comportamento da rugosidade do furo de corrida pode ser visualizado no gráfico da Figura 6.

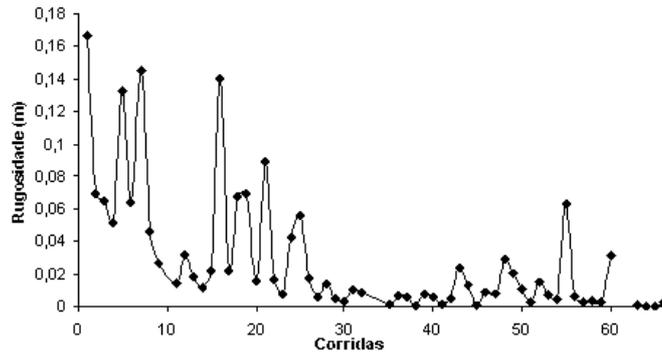


Figura 6. Variação da rugosidade do furo de corrida ao longo das corridas.

A alteração da rugosidade não acontece de forma crescente e sim de forma decrescente. O furo de corrida sofre um desgaste inicial acentuado, pois inicialmente esperava-se uma rugosidade menor, mas em função das condições de partida do furo, como a presença do flange de aço para montagem das manilhas e manilhas sem pré-aquecimento, há um aumento da rugosidade calculada no início. Com o passar das corridas, as condições iniciais perdem influência e outros mecanismos passam a influenciar o valor da rugosidade, como a descarbonetação da manilha seguida de infiltração e ataque da escória com arrancamentos de grãos. As variações bruscas nos valores de rugosidade estão associadas a reparos preventivos no canal com objetivo de aumentar vida do furo e o tempo de vazamento.

3.2 Variáveis de Influência no Vazamento

Muitas vezes o aço ou escória solidifica na parede do furo de corrida levando algum tempo para ser removido. Este fato por sua vez pode tanto alterar a rugosidade das manilhas que compõem o canal bem como o diâmetro do furo de corrida. O processo de erosão ou impacto da sucata no convertedor pode desprender partes do refratário obstruindo o furo de corrida ou aumentando o seu diâmetro. A formação de cascão próximo à boca do convertedor impossibilita o trabalho do mesmo em um ângulo ideal de vazamento, aumentando assim o tempo para vazar o aço.

3.3 Geometrias do Furo de Corrida

Para um vazamento compreendido entre 180 e 240 segundos, tanto a geometria com chanfro ou a geometria com furo de maior diâmetro fornecem resultados desejados, melhorando o desempenho em relação à situação atual. Ambas as geometrias possuem um maior número de corridas dentro da faixa de 180-240 segundos, comparado com a geometria de diâmetro de 0.101m. O gráfico da Figura 7 exibe o tempo calculado para os três diferentes perfis geométricos do furo de corrida. O gráfico em pontilhado representa a situação atual do furo de corrida de perfil cilíndrico e diâmetro de 0.101 m, gráfico com pontos redondos em preto o furo de corrida com um chanfro na entrada, enquanto que o gráfico com pontos triangulares em cinza representa o perfil cilíndrico com diâmetro de 0.106m

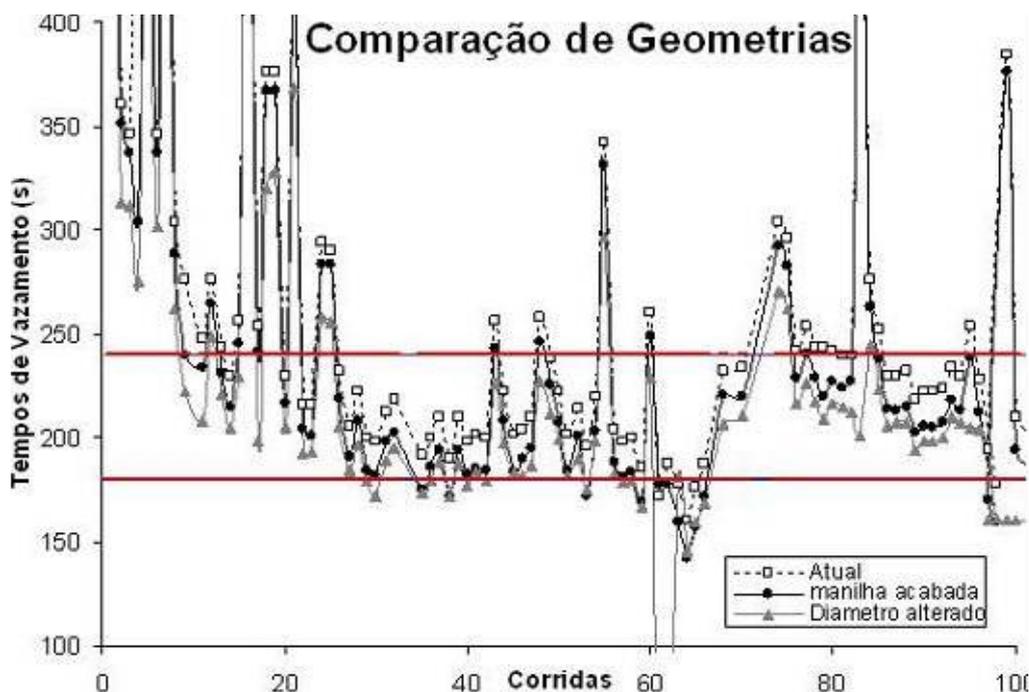


Figura 7. Tempos de vazamentos para diferentes geometrias do furo de corrida

Um desgaste prematuro poderia ocorrer para o furo com diâmetro maior, logo, este produziria valores de tempos menores que 180 segundos dentro das 100 primeiras corridas inutilizando o furo de corrida. É também fato que este furo de corrida teria os tempos de vazamentos reduzidos após estas 100 corridas, resultante do desgaste natural. Portanto, este fato diminui a vida do furo, pois um pequeno desgaste já o inutilizaria, devido ao trabalho do mesmo próximo a faixa de valores da linha de 180 segundos. Assim, a geometria com chanfro na entrada é melhor por estar menos susceptível ao desgaste, seja pela forma de mudança suavizada de geometria ou por suportar um desgaste maior antes do furo ser inutilizado.

O posicionamento do furo de corrida no convertidor pode ser alterado em 5° no sentido anti-horário em relação a horizontal, conforme a Figura 8.

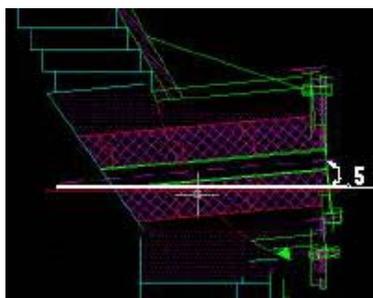


Figura 8. Reposicionamento do furo de corrida no convertidor com 5°

Este novo posicionamento também diminui a variabilidade do tempo de vazamento, garantindo maior quantidade de aço em cima do canal durante os ângulos finais de vazamento. Valores de tempos de vazamento para várias geometrias podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1. Tempo de vazamento para várias geometrias

Diâmetro 0.101	Chanfro na Entrada	Diâmetro 0.106	Reposicionamento e diâmetro 0.106
290	283	255	255
232	219	206	205
206	191	184	192
222	208	197	199
200	184	179	185

A Tabela 1 revela o efeito do reposicionamento do canal. O reposicionamento reduz a amplitude da variação do tempo de vazamento. É de importância, retratar que para o convertedor com geometria inalterada, ou seja, sem ter sofrido desgaste ou formação de cascão, o reposicionamento do furo de corrida diminui o tempo de vazamento de aço, resultando no ganho de uma corrida ao mês.

4 CONCLUSÃO

Para um vazamento estável compreendido no tempo de 180 a 240 segundos, deve-se modificar a geometria do furo de corrida, através das seguintes modificações:

- Inserção de um chanfro na entrada do furo de corrida;
- Reposicionamento do furo de corrida em 5° no convertedor;
- Operação de limpeza com maior frequência na boca do conversor.

Agradecimentos

À GERDAU e a todos da equipe de Barão de Cocais, que tornaram possível este trabalho. À VM Tubes, Dione Moreira, Leandro Almeida, Takeshi Fujii, pelo apoio e recepção na VM.

REFERÊNCIAS

- 1 KEMENY, F., WALKER D., JONES, J. Optimum vessel tapping. In AISTECH, 2005, Charlotte. Conference Proceedings...Charlotte: Association for Iron and Steel technology, 2005. Vol 1. p. 691-699.
- 2 GLASS, D. R., SMITH, G.C., **BOF Steelmaking**.. Nova York: The Iron and Steel Society of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc, 1976.Vol. 3
- 3 AUAD M.V. Refratários para convertedor LD. In CELSO, D., CASTRO, L.F. (ed). **Fabricação de aço em forno básico a oxigênio**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. Cap 10
- 4 Geiger, G., H., Poirier, D., **Transport Phenomena in Metallurgy**. ADDISON WESLEY COMPANY, California,1980