

MODELAMENTO FÍSICO DE PANELA DE AÇO 80T E SUA APLICAÇÃO EM ESCALA INDUSTRIAL NA V&M DO BRASIL¹

*Victor Lambertucci Araújo Alberto*²
*Oswaldo Alves Ferreira Neto*³
*Thiago Moreira Pinto*⁴
*Carlos Antonio da Silva*⁵
*Takeshi Fujii*⁶
*Hudson Guerra Asth*⁷
*Itavahn Alves da Silva*⁸

Resumo

Este presente estudo tem o objetivo de determinar a razão entre a área da superfície do olho de argônio em comparação com a área total coberta por escória, baseado em um modelo físico de panela construído em laboratório (escala 1:5). A análise dos resultados obtidos permite concluir que há uma relação entre as áreas do olho de argônio e a superfície coberta por escória, a vazão de argônio injetada e da espessura de escória.

Palavras-chave: Aciaria; Modelamento físico; Panela.

PHYSICAL MODELING OF A 80 TON V&M OF BRAZIL STEEL LADLE AND RESULTS OF INDUSTRIAL APPLICATION

Abstract

A 1:5 scale physical model of a 80 ton V&M of Brazil steel ladle was used to assess the plume eye opening as a fraction of the ladle cross sectional area. Eye opening measurements have been made in the actual plant as a function of gas flowrate and the thickness of slag layer. Thus modeling results and physical modeling results could be compared. A reasonable agreement has been found.

Key words: Steelmaking; Physical modeling; Ladle.

¹ *Contribuição técnica ao XXXIX Seminário de Aciaria – Internacional, 12 a 16 de maio de 2008, Curitiba, PR, Brasil*

² *Engº Mecânico, Tratamento Térmico da Laminação Automática da V&M do BRASIL S.A.*

³ *Engº Metalurgista, M. Sc., P&D da Área Siderúrgica da V&M do BRASIL S.A.*

⁴ *Estagiário de Engª Metalúrgica, P&D da Área Siderúrgica da V&M do BRASIL S.A.*

⁵ *Engº Metalurgista, PhD., Prof. Associado, Dep. de Metalurgia, Escola de Minas/UFOP.*

⁶ *Engº Metalurgista, M. Sc., P&D da Área Siderúrgica da V&M do BRASIL S.A.*

⁷ *Engº Metalurgista, Departamento de Aciaria da V&M do BRASIL S.A.*

⁸ *Engº Metalurgista, DSc, Prof. Associado, Dep. de Metalurgia, Escola de Minas/UFOP.*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Processo de Refino

Durante a etapa de refino na panela, o aço líquido é agitado por gás inerte com a finalidade de homogeneizá-lo química e termicamente, intensificar as reações banho/escória e remover as inclusões. Atualmente a utilização de modelagem física tem sido uma boa alternativa técnica e econômica para o estudo de escoamento e avaliação da influência de diversos parâmetros, como: vazão de gás e posição de injetores, tipo de plugues, na qualidade do escoamento e da mistura, no caso de panelas de aço.

1.2 Agitação por Borbulhamento de Gases Inertes

Este tipo de agitação é um dos processos mais comuns de metalurgia em panela e é utilizada largamente nas aciarias, mesmo sem existência de um Forno Panela. A injeção de gases é normalmente feita através de tijolo poroso ou plugues. A representação da evolução dos gases em meio líquido é mostrada na figura 1, para o caso de borbulhamento através de tijolo poroso posicionado no centro da panela. A região de passagem das bolhas de gás é chamada de *pluma*, tendo o formato de um cogumelo. A parte superior da pluma recebe o nome de *domo*, cuja região exposta à atmosfera tem o nome de *olho*.

O efeito de movimentação para o aquecimento, agitação, auxilia na flutuação ou flotação das inclusões existentes e homogeneizar o banho química e termicamente, há uma enorme importância na renovação do aço na interface com a escória. Por esses motivos a agitação por injeção de gases inertes, ou borbulhamento, é utilizada durante o refino do aço.

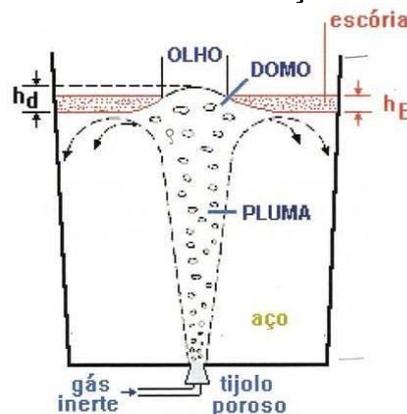


Figura 1 - Injeção de gases por tijolos porosos localizados no centro da panela.

1.3 Modelagem Física

O modelo físico de panela de aço, da Vallourec & Mannesmann do Brasil, foi construído em acrílico, na escala de 1:5, e operado nas dependências do Departamento de Metalurgia da Escola de Minas da UFOP. A Tabela 1 apresenta algumas das características geométricas mais importantes, do modelo e protótipo. O modelo foi operado obedecendo à relação entre vazões de gás, provinda de critérios de similaridade,

$$Q_{\text{modelo}} = \lambda^{2,50} Q_{\text{industrial}}$$

onde λ representa o fator de escala. Para simular aço e escória foram empregados água, solução de cloreto de zinco em água e óleos de silicone de diversas viscosidades. Três diferentes espessuras de camada de óleo foram empregadas. Ar comprimido foi injetado através de dois plugues situados no fundo da panela, em diversas combinações de vazões. A avaliação da abertura do olho foi realizada através de filmes com vista do topo do sistema os quais permitiam contrastar as superfícies da solução aquosa e do óleo.

Tabela 1: Principais características geométricas do protótipo e modelo.

Características no protótipo e modelo.

Descrição	Protótipo	Modelo
Volume de líquido	12 m ³	80 l
Diâmetro interno da parte superior da panela	2,65 m	0,53 m
Diâmetro interno da parte inferior da panela	2,25 m	0,45 m
Altura da panela	4,25 m	0,85 m
Altura de líquido na panela	2,5 m	0,50 m
Borda Livre	0,60 – 1 m	0,12 – 0,2 m
Vazões de trabalho (l/min/plugue)	50 – 1000 NI/min	1 – 20 NI/min
Diâmetro do plugue de argônio (mm)	125 mm	25 mm

Fonte: Relatório Técnico Modelo Físico de Panela Vallourec & Mannesmann do Brasil

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Como citado os experimentos para obtenção de dados no modelo foram realizados na Universidade Federal de Ouro Preto (Escola de Minas/UFOP) utilizando-se solução aquosa para a simulação do aço e ar comprimido para simulação dos fluxos de argônio. Durante os experimentos, usando o modelo físico, foram avaliadas a diferentes condições de operação e sua influência de acordo com vazões e espessura de escória, portanto de acordo com as condições reais de trabalho.

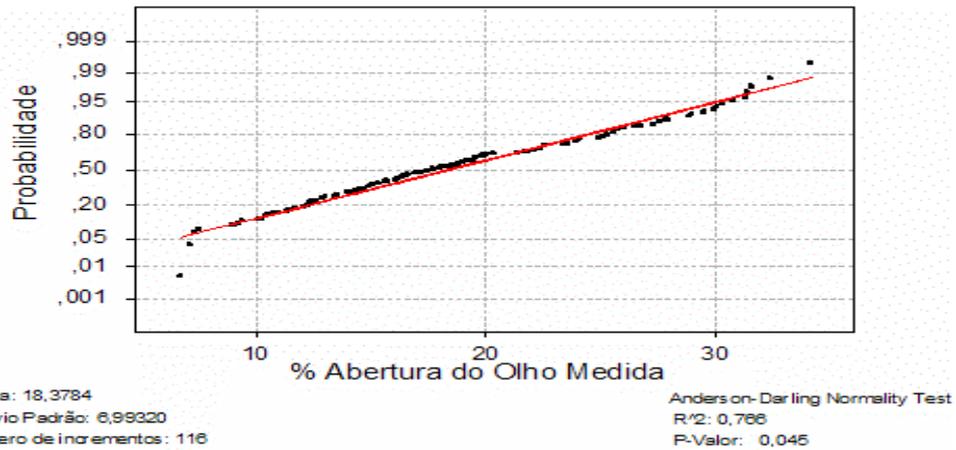
Este teste foi reproduzido, salvo algumas particularidades, em escala industrial de forma a avaliar qual seria o comportamento da superfície do banho metálico quando as mesmas vazões fossem injetadas através dos plugues porosos na panela de aço.

Em ambos os experimentos a relação de áreas, para protótipo e para modelo, foi obtida através de fotografias da área da superfície do banho e análise estatística.

2.1 Avaliação dos resultados

2.1.1 Análise dos resultados do Protótipo

Um teste de normalidade para a porcentagem de Abertura de Olho, indica que os dados relativos aos experimentos industriais não apresentam uma distribuição normal, pois $p = 0,045$, onde $p < 0,05$ para 0,95 de confiança rejeitando a hipótese H_0 (os dados seguem a normalidade), apesar de um bom valor para coeficiente de determinação da reta ($R^2 = 0,766$) (Figura 2).



Fonte: Análise dos dados através do Software Minitab™ 14

Figura 2 - Teste de normalidade para a % de Abertura de Olho conforme dados obtidos nos testes em escala industrial.

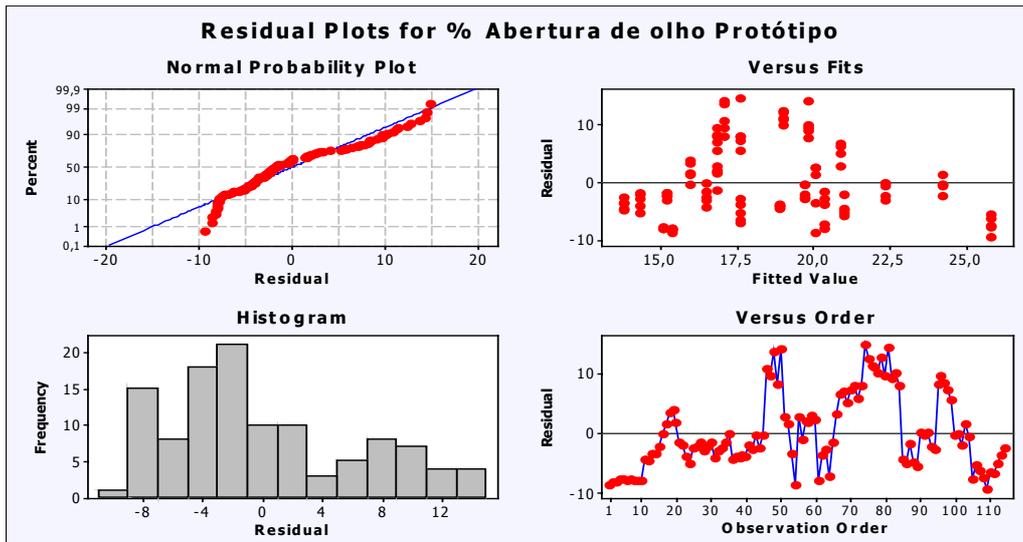
Realizou-se análise de correlação das variáveis em relação ao % de abertura de olho, sendo obtido através do Software Minitab™ 14:

Correlations: % Abertura de olho medida; Espessura de escória (cm); Vazão Total (l/min).

	% Abertura de olho	Espessura de escória
Espessura de escória	0,220	
	0,019	
Vazão Total	0,400	0,118(Cell Contents: Pearson correlation)
	0,000	0,21 (P-Value)

Os valores p (ou p-value) encontrados mostram que não há uma relação entre vazão total x espessura de escória ($p = 0,21$), pois o valor $p > 0,05$ rejeita a hipótese H_0 (os dados apresentam uma correlação), em uma análise de regressão simples. Já na análise do coeficiente de correlação viu-se que a vazão de argônio ($CC = 0,4000$) tem uma influência maior sobre o % de abertura do olho quando comparado à espessura de escória ($CC = 0,220$).

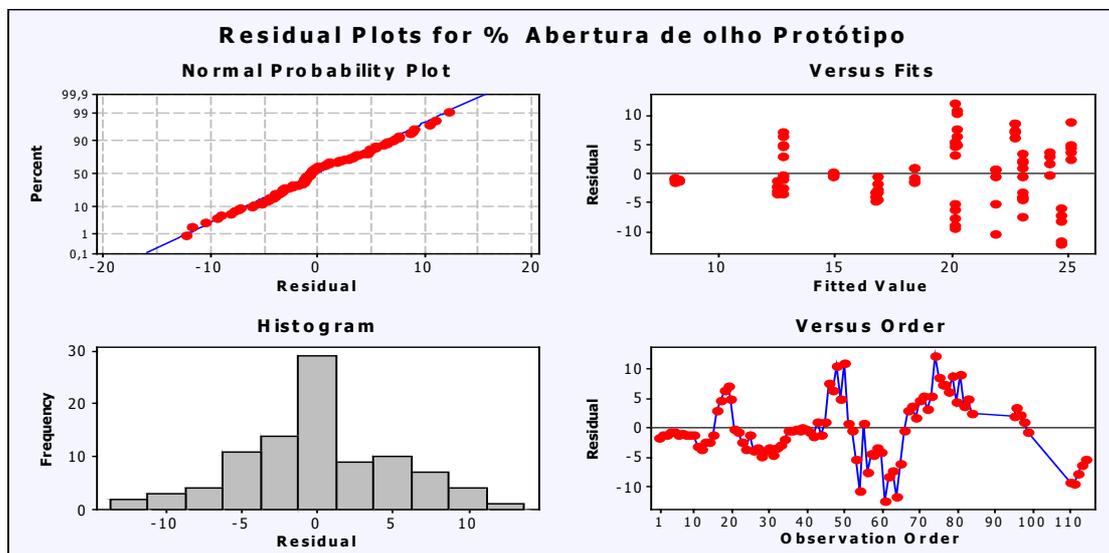
Regressão linear, considerando expressão do tipo $F(\% \text{abertura de olho}) = \text{Constante} + A \cdot \text{Vazão total (l/min)} + \text{Espessura de escória (cm)}$, indica haver uma tendência dos dados se alinharem de forma quadrática (parábola), de acordo com análise do gráfico de resíduos conforme Figura 3.



Fonte: Análise dos dados através do Software Minitab™ 14

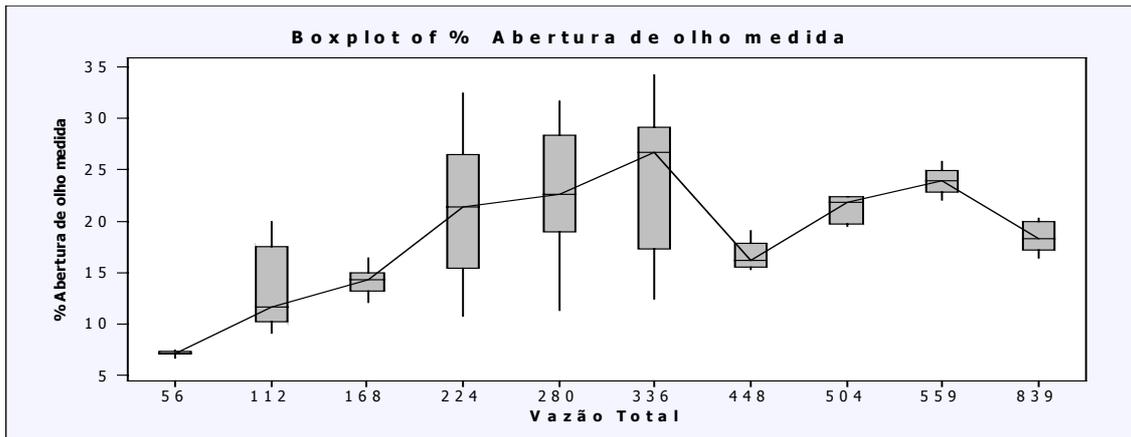
Figura 3: Análise de resíduos para o % de Abertura do olho no protótipo.

Realizou-se várias regressões lineares transformando os dados de forma a obter-se o melhor coeficiente de correlação para a regressão e significância para as variáveis, considerando o $p < 0,10$. Na análise do gráfico de resíduos dos dados transformados para a regressão, conforme figura 4 e figura 5, observa-se uma dispersão dos dados em forma de “y” mostrando que há uma diferença de comportamento da % de abertura de olho quando um valor (336 NL/min), para a variável de vazão total, é atingido.



Fonte: Análise dos dados através do Software Minitab™ 14

Figura 4: Box Plot para % abertura de olho x vazão total.



Fonte: Análise dos dados através do Software Minitab™ 14

Figura 5 : Box Plot para % abertura de olho x vazão total.

A solução adotada foi procurar outro modelo eliminando os “outliers” da massa de dados coletados durante o teste no protótipo, considerando uma faixa de vazão próxima a utilizada pela operação, entre 50l/min e 336 l/min e transformando os dados. A melhor regressão obtida ajustando as variáveis, conforme análise do p-value é:

$$\% \text{ Abertura de olho Protótipo} = 26,2 + 0,0359 \text{ Vazão Total} - 4,51 \text{ Espessura de escória (cm)} + 0,248 \text{ Espessura de escória}^2$$

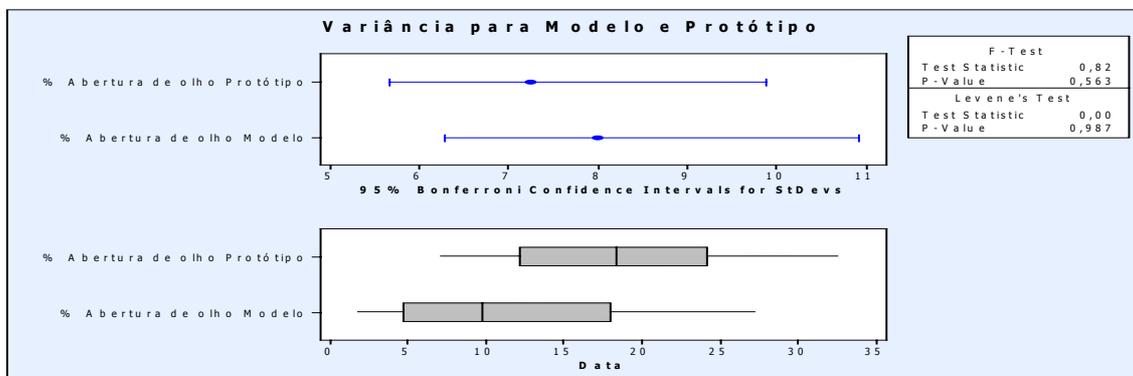
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	26,171	4,750	5,51	0,000	
Vazão Total	0,035862	0,003136	11,44	0,000	1,255
Espessura de escória (cm)	-4,506	1,034	-4,36	0,000	73,340
Espessura de escória 2	0,24751	0,05622	4,40	0,000	75,096

S = 1,67565 R-Sq = 88,6% **R-Sq(adj) = 87,5%**

PRESS = 108,499 R-Sq(pred) = 85,77%

2.1.2 Análise comparativa entre modelo e protótipo

Para a comparação entre modelo e protótipo utilizou-se a técnica de variância, comparando-se os valores obtidos pelo modelo e protótipo para as mesmas condições de vazões totais; observou-se que não há diferença significativa no desvio padrão para as amostras, pois se encontra $p > 0,05$ (p-value).

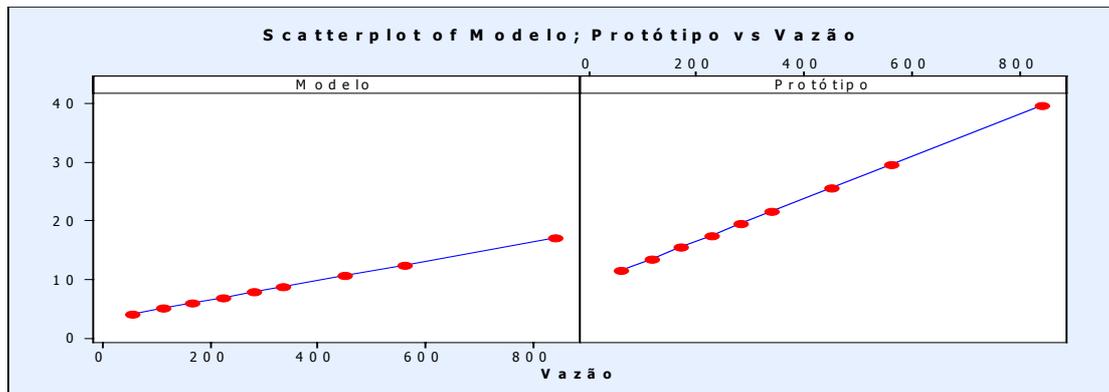


Fonte: Análise dos dados através do Software Minitab™ 14

Figura 6: Análise de variância para % abertura de olho x vazão total.

Há uma diferença nos valores médios, máximos, mínimos e da mediana quando comparados à porcentagem de abertura do modelo ao protótipo e a distribuição no modelo (Figura 6) pelo deslocamento da mediana para o lado.

Com a utilização das equações obtidas nas regressões de modelo e protótipo, observa-se que no caso do protótipo o % de abertura de olho de argônio é maior comparado os valores obtidos no modelo (Figura 7) para as mesmas vazões correspondentes calculadas de acordo com o critério de similaridade e considerando uma espessura de escória igual a 10cm, conforme Tabela 2.



Fonte: Análise dos dados através do Software Minitab™ 14

Figura 7: Diagrama de dispersão para o % abertura de olho x vazão tptal utilizando as equações de regressão.

Tabela 2: Dados obtidos utilizando as equações de regressão para modelo e protótipo.

Vazão Modelo	1	2	3	4	5	6	8	10	15
Vazão Protótipo	56	112	168	224	280	336	448	559	839
Espessura de escória modelo (cm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Espessura de escória protótipo (cm)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
% de abertura de olho modelo	7	8	9	10	10	11	13	15	20
% de abertura de olho protótipo	8	10	12	14	16	18	22	26	36

Fonte: Análise dos dados através do Software Minitab™ 14

Na análise entre a razão dos percentuais de abertura de olho (Tabela 2), utilizando as equações de regressão obtidas para modelo e protótipo, nota-se que há uma relação logarítmica com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9953$, tal como indica a Figura 8.

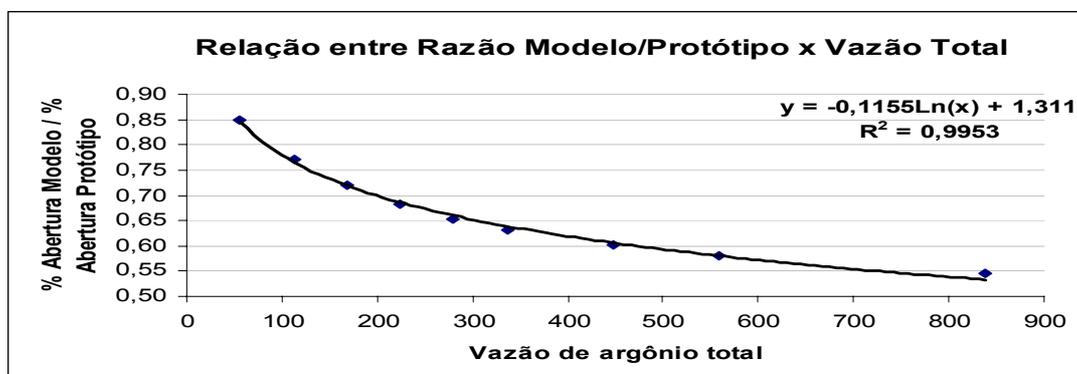


Figura 8: Relação entre a razão das % de abertura de olho (modelo / protótipo) calculado pelas equações de regressão x vazão de argônio.

Tabela 3: Dados obtidos utilizando as equações de regressão para modelo e protótipo e fator de correção pela função logarítmica.

Dados	Configurações									
	1	2	3	4	5	6	8	10	15	
Vazão Modelo	56	112	168	224	280	336	448	559	839	
Vazão Protótipo	0,85	0,77	0,72	0,68	0,65	0,63	0,60	0,58	0,55	
Espessura de escória modelo (cm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Espessura de escória protótipo (cm)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
% de abertura de olho modelo	7	8	9	10	10	11	13	15	20	
% de abertura de olho protótipo	8	10	12	14	16	18	22	26	36	
% de abertura de olho protótipo (com fator peso líquido)	8	11	13	16	18	20	25	30	43	
% de abertura de olho protótipo (com fator de correção e peso líquido)	7	8	9	11	12	13	15	18	23	
% de abertura de olho protótipo (com fator de correção)	7	8	9	10	11	11	13	15	19	

Os resultados, acrescentando o fator de correção dado pela função logarítmica $y = -0,1155\ln(x) + 1,311$, na equação para o protótipo (caixa de texto azul) mostram que há um ajuste muito próximo ao obtido via modelagem física (caixa de texto amarela), conforme Figura 9 e Tabela 3.

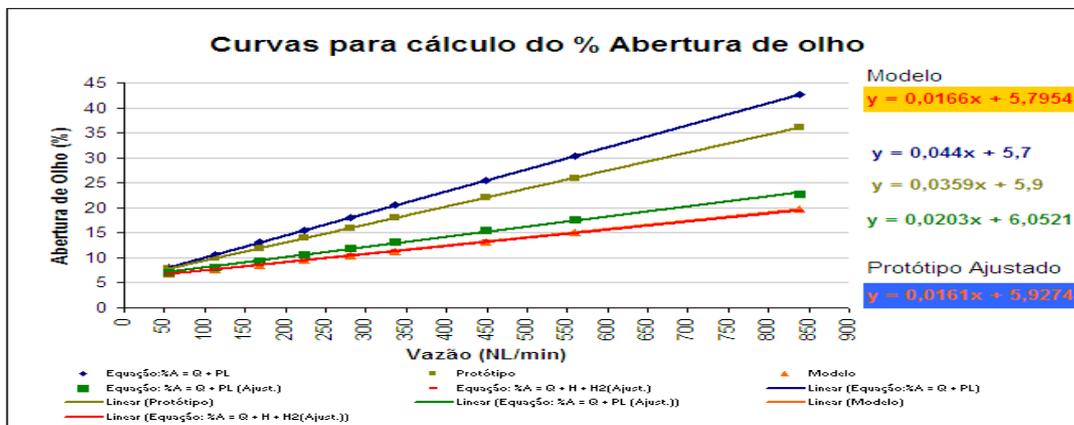


Figura 9: Relação entre a razão do % de abertura de olho calculado pelas equações de regressão x vazão de argônio.

Realizada a regressão considerando o peso líquido de aço na panela e desconsiderando a espessura de escória como variável foram obtidas novas estimativas do % abertura do olho com e sem acrescentar o coeficiente de ajuste obtido na função logarítmica $y = -0,1155\ln(x) + 1,311$. Os resultados mostram que a curvatura e distribuição em comparação aos dados calculados pela equação obtida na modelagem física, conforme Figura 9 (linhas: azul e amarela), não são tão próximas, mesmo comparadas aos valores calculados pela função obtida no teste industrial (protótipo).

A reprodutibilidade de testes com altas vazões foi prejudicada devido ao risco pela exposição à alta temperatura radiante e a dificuldade de distinção do olho de argônio utilizando uma máquina fotográfica digital comercial para a captação das imagens para análise.

Notou-se que à medida que a vazão de argônio, ou ar, é aumentada a razão entre as aberturas do olho se torna menor, mostrando que há uma diferença entre modelo e protótipo, porém, a % abertura de olho pode ser ajustada através do incremento do valor obtido na função logarítmica, conforme Figura 9.

3 CONCLUSÕES

O melhor ajuste para o percentual de abertura de olho no teste em escala industrial (protótipo) é obtido utilizando a equação:

$$\% \text{ Abertura de olho Protótipo} = 26,2 + 0,0359 \text{ Vazão Total} - 4,51 \text{ Espessura de escória (cm)} + 0,248 \text{ Espessura de escória}^2$$

A equação obtida com o modelo de regressão linear múltipla pode ser utilizada na operação do refino secundário, conforme abaixo:

- Para momentos onde sejam feitas as adições de ligas é interessante que seja feita a injeção de gases em vazões próximas a 336 l/min, para a abertura do olho no plugue 1.
- Durante a etapa de refino deve-se trabalhar com vazões próximas a 56 l/min por plugue, para minimização dos níveis de reoxidação do banho.

A adequação dos dados obtidos no modelo ao protótipo pode ser realizada de utilizando a função logarítmica $y = -0,1155 \ln(\text{Vazão Total}) + 1,311$. Deve-se avaliar a real necessidade de se determinar com exatidão do % abertura do olho.

A análise de variância para o protótipo mostra que há uma diferença de comportamento da porcentagem da abertura de olho quando os valores da vazão total ultrapassam 336l/min.

No teste de correlação mostrou-se que a espessura de escória não possui uma boa representatividade na estimativa do percentual da abertura do olho comparado à vazão total de gás injetado.

No caso do teste utilizando a modelagem física foi fixada a quantidade de líquido no reator e a área superficial do plugue poroso. Estes são fatos não acontecem em escala industrial, pois, atualmente, a carga líquida é programada em função da tara da panela (panela vazia) e há uma variação na condição de injeção de gás pelos plugues percebidos através dos valores de contra pressão (pressão ferrostática + acúmulo de carga) durante a operação.

REFERÊNCIAS

- 1 Seon-Hyo Kim, R.J. Fruehan, R.I.L. Guthrie; **Physical model studies of two phase mass transfer in gas stirred ladles**; Steelmaking Conference Proceeding, ISS, pp. 107-117;
- 2 SMIRNOV, Alexey et al; **Optimization Argon injection process parameters for a ladle treatment steel**; Donestk National Technical University – Feuro GbmH; 5Th European Oxygen Steelmaking Congress, 2006;
- 3 SILVA, Carlos Antonio da, **Teste de Emulsificação de Escória**, Relatório Técnico Modelo Físico de Panela Vallourec & Mannesmann do Brasil, 2005;
- 4 SILVA, Carlos Antonio da, **Considerações Gerais para a Construção do Modelo Físico**, Relatório Técnico Modelo Físico de Panela Vallourec & Mannesmann do Brasil, 2005.
- 5 Drumond, Fátima, **Six Sigma**, DMEP, Módulo II – Capacitação de Equipes, 2006.