

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA INJEÇÃO DE GÁS
NA CÂMARA DE VÁCUO DO MODELO FÍSICO
DE UM DESGASEIFICADOR RH**

Autor: Leonardo Neves

Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

Fevereiro/ 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Leonardo Neves

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA INJEÇÃO DE GÁS NA CÂMARA DE VÁCUO
DO MODELO FÍSICO DE UM DESGASEIFICADOR RH

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2008

AGRADECIMENTOS

Ao professor Roberto Parreiras Tavares pela orientação recebida, confiança e amizade.

Aos professores e amigos, Varadarajan Seshadri e Luiz Fernando Andrade de Castro pelos ensinamentos e pela confiança recebida.

À Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pela infra-estrutura disponibilizada e pelo apoio recebido.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de mestrado.

Ao técnico Hugo Passos Ornelas de Oliveira pelo apoio e determinação na realização dos ensaios.

Aos colegas do Laboratório e Simulação de Processos (LaSiP) pelo apoio dado e pela amizade estabelecida em todo esse período.

À minha noiva Fabiany, que esteve todo esse tempo ao meu lado, me apoiando em todos os momentos.

A toda minha família, em especial meus pais Carlos e Carmem, que sempre me incentivaram.

SUMÁRIO

	PÁGINA
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Histórico do Processo RH.....	4
3.2. Características do Processo RH.....	5
3.3. Análise Termodinâmica das Reações do Processo RH.....	6
3.4. Taxa de circulação.....	9
3.4.1. Efeito das variáveis sobre a taxa de circulação do aço.....	13
3.4.1.1. Taxa de injeção de gás na perna de subida.....	14
3.4.1.2. Taxa de injeção de gás no fundo da panela.....	16
3.4.1.3. Diâmetro das pernas de descida e subida.....	16
3.4.1.4. Número de pernas.....	17
3.4.1.5. Número e diâmetro de bicos de injeção.....	20
3.4.1.6. Nível dos bicos na perna de subida e profundidade do banho na câmara de vácuo.....	22
3.4.1.7. Obstrução dos bicos de injeção.....	22
3.4.1.8. Efeito do campo magnético de rotação.....	24
3.4.2. Expressões para cálculo da taxa de circulação.....	26
3.5. Cinética de Descarburização.....	27
4. METODOLOGIA.....	45
4.1. Aparato Experimental.....	45
4.1.1. Dimensionamento do modelo físico.....	46
4.1.2. Características do modelo físico.....	47
4.2. Experimentos.....	50
4.2.1. Taxa de circulação.....	50
4.2.2. Taxa de descarburização.....	53
4.2.3. Tratamento das imagens da câmara de vácuo.....	57
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59

5.1. Efeito da Injeção de Gás na Câmara de Vácuo sobre a Taxa de Circulação.....	59
5.1.1. Bicos de 1 milímetro de diâmetro na câmara de vácuo.....	59
5.1.2. Bicos de 1,5 milímetro de diâmetro na câmara de vácuo.....	61
5.1.3. Bicos de 2,2 milímetros de diâmetro na câmara de vácuo.....	63
5.1.4. Bicos de 2,8 milímetros de diâmetro na câmara de vácuo.....	65
5.1.5. Análise dos resultados da taxa de circulação com o efeito da injeção na câmara de vácuo.....	66
5.2. Efeito da Injeção de Gás na Câmara de Vácuo na Cinética de Descarburacão.....	68
5.2.1. Bicos de 1 milímetro de diâmetro na câmara de vácuo.....	69
5.2.2. Bicos de 1,5 milímetro de diâmetro na câmara de vácuo.....	71
5.2.3. Bicos de 2,2 milímetros de diâmetro na câmara de vácuo.....	72
5.2.4. Bicos de 2,8 milímetros de diâmetro na câmara de vácuo.....	74
5.2.5. Análise dos resultados da cinética de descarburacão com o efeito da injeção na câmara de vácuo.....	75
5.3. Coeficiente Volumétrico de Transferência de Massa	75
5.3.1. Bicos de 1 milímetro de diâmetro na câmara de vácuo.....	77
5.3.2. Bicos de 1,5 milímetro de diâmetro na câmara de vácuo.....	82
5.3.3. Bicos de 2,2 milímetros de diâmetro na câmara de vácuo.....	85
5.3.4. Bicos de 2,8 milímetros de diâmetro na câmara de vácuo.....	89
5.3.5. Análise dos efeitos do coeficiente volumétrico de transferência de massa e a taxa de circulação na cinética de descarburacão.....	92

6. CONCLUSÕES.....	94
7. TRABALHOS FUTUROS.....	96
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
APÊNDICE I.....	102

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 3.1 – Visão esquemática do processo RH.....	5
Figura 3.2 – Relação %C x %O com Temperatura Constante ($T = 1600^{\circ}\text{C}$).....	8
Figura 3.3 – Dispersão do ouro radiativo como traçador com o tempo.....	10
Figura 3.4 – Comparação da concentração de traçador no ponto 1 e no ponto 2 com o teste em planta, sendo D_d o diâmetro da perna de descida, V_d a velocidade média na perna de descida e SID a profundidade de imersão das pernas.....	12
Figura 3.5 – Comparação das velocidades na perna de descida medidas no modelo físico e previstas pelo modelo matemático.....	13
Figura 3.6 – Taxa de Circulação X Vazão de Gás.....	15
Figura 3.7 – Taxa de circulação variando com Vazão de gás.....	15
Figura 3.8 – Efeito da injeção do gás, pelo fundo da panela, sobre a taxa de circulação do metal líquido.....	16
Figura 3.9 – Relação entre a taxa de circulação e a seção transversal das pernas.....	17
Figura 3.10 – Vista esquemática do modelo físico do desgaseificador RH em (a) com duas pernas e em (b) com multipernas.....	18
Figura 3.11 – Efeito da vazão de ar nas taxas de circulação do modelo físico de um vaso desgaseificador RH.....	19
Figura 3.12 – Taxa de circulação específica do RH e REDA.....	20
Figura 3.13 – Medidas da taxa de circulação no modelo de desgaseificador de Llawern para vários números de bicos na perna de subida.....	21
Figura 3.14 – Localização dos bicos (Bloqueio simétrico: bicos do nível inferior 2, 4, 6 e 8 e bicos do nível superior 9, 11, 13 e 15; Bloqueio assimétrico: bicos do nível inferior 1, 6, 7 e 8 e bicos do nível superior 9, 14, 15 e 16).....	23
Figura 3.15 – Efeito da obstrução dos bicos de injeção sobre a taxa de circulação..	23
Figura 3.16 – Efeito do aumento potência na distribuição das bolhas na perna de subida, $Q=0,5 \text{ m}^3/\text{h}$. a) 0W, b) 20 W, c) 25 W e d) 35 W.....	25
Figura 3.17 – Efeito do aumento da potência dos rotores na taxa de circulação em 3 vazões de ar.....	25

Figura 3.18 – Concentração das espécies do dióxido de carbono dissolvido em soluções aquosas versus pH.....	28
Figura 3.19 – Relação entre $\ln(C/C_i)$ e o tempo sob várias pressões no interior do vaso, sendo C_i a concentração inicial de CO_2 dissolvido na água deionizada.....	29
Figura 3.20 – Influência da pressão na câmara de vácuo em relação à variação do teor de carbono com o tempo, segundo Kishimoto et al.....	30
Figura 3.21 – Relação entre o teor de carbono e o coeficiente volumétrico de transferência de massa de carbono na interface metal/gás por unidade de área da seção transversal do vaso, ak/S	31
Figura 3.22 – Dispersão dos bicos com de 1, 8 e 16 furos no interior da câmara de vácuo.....	33
Figura 3.23 – Regiões onde ocorrem as reações de descarburização e desgaseificação.....	36
Figura 3.24 – Influência da área da superfície livre sobre a descarburização, sendo $[\%C]_L$ a concentração de carbono na panela, G_s a vazão de argônio gasoso injetado.....	37
Figura 3.25 – Efeito do sopro de oxigênio na taxa de descarburização.....	38
Figura 3.26 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa da descarburização pela taxa de circulação e taxa constante.....	40
Figura 3.27 – Efeito do processo de injeção RH com o processo convencional na reação de descarburização sob condições de alto vácuo (2 Torr), segundo Endoh et al (1990).....	42
Figura 3.28 – Influência da taxa de circulação na mudança do teor de carbono com o tempo na panela e na câmara de vácuo, sendo C_L a concentração de carbono dissolvido na panela e C_V a concentração de carbono dissolvido na câmara de vácuo.....	43
Figura 3.29 – Comparação entre os cálculos de concentração de carbono e oxigênio pelo modelo desenvolvido com resultados medidos em um desgaseificador RH.....	44
Figura 4.1 – Vista do Modelo Físico Reator RH.....	46
Figura 4.2 – Representação esquemática dos parâmetros do modelo físico utilizado para os experimentos.....	49

Figura 4.3	– Detalhes da distribuição dos bicos no interior da câmara de vácuo, onde em a) pode se observar a vista de planta da base da câmara de vácuo, e em b) o detalhe dos bicos no perímetro da perna de subida na base da câmara de vácuo.....	49
Figura 4.4	– Vista esquemática do modelo físico do reator RH com os sensores utilizados no teste.....	51
Figura 4.5	– Curva de distribuição de tempo de homogeneização, de onde são tirados os dados para se calcular a taxa de circulação.....	52
Figura 4.6	– Profundidade de imersão dos eletrodos de temperatura e pH.....	55
Figura 4.7	– Vista de baixo do modelo físico desgaseificador RH com a posição dos eletrodos de pH e temperatura próximos à perna de subida.....	56
Figura 4.8	– Representação gráfica da equação 4.9 com dados de um dos ensaios realizados.....	57
Figura 4.9	– Padrão utilizado para o tratamento de dados de imagem com o programa de domínio público Image J. Sendo que em b), representa-se a área tratada em a).....	58
Figura 5.1	– Análise da taxa de circulação com a injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo com bicos de 1mm.....	61
Figura 5.2	– Análise da taxa de circulação com a injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo com bicos de 1,5 mm.....	63
Figura 5.3	– Análise da taxa de circulação com a injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo com bicos de 2,2mm.....	64
Figura 5.4	– Análise da taxa de circulação com a injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo com bicos de 2,8mm.....	65
Figura 5.5	– Análise da constante cinética de reação com injeção de gás na câmara de vácuo com bicos de 1mm. CV significa câmara de vácuo e PS perna de subida.....	70
Figura 5.6	– Vista de planta da figura 5.5.....	71
Figura 5.7	– Análise da constante cinética da reação com injeção de gás na câmara de vácuo com bicos de 1,5mm. CV significa câmara de	

	vácuo e PS perna de subida.....	72
Figura 5.8 –	Análise da constante cinética da reação com injeção de gás na câmara de vácuo com bicos de 2,2mm. CV significa câmara de vácuo e PS perna de subida.....	73
Figura 5.9 –	Análise da constante cinética da reação com injeção de gás na câmara de vácuo com bicos de 2,8mm. CV significa câmara de vácuo e PS perna de subida.....	74
Figura 5.10 –	Variação do coeficiente volumétrico com a porcentagem de área da pluma na câmara de vácuo.....	77
Figura 5.11 –	Resultado da injeção na câmara de vácuo com bicos de 1 milímetro de diâmetro e injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo e o coeficiente volumétrico de transferência de massa.....	79
Figura 5.12 –	Vista de planta da figura 5.11.....	79
Figura 5.13 –	Resultado da injeção na câmara de vácuo com bicos de 1,5 milímetro de diâmetro e injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo e o coeficiente volumétrico de transferência de massa.....	83
Figura 5.14 –	Resultado da injeção na câmara de vácuo com bicos de 2,2 milímetro de diâmetro e injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo e o coeficiente volumétrico de transferência de massa.....	86
Figura 5.15 –	Resultado da injeção na câmara de vácuo com bicos de 2,8 milímetro de diâmetro e injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo e o coeficiente volumétrico de transferência de massa.....	89

LISTA DE TABELAS

	PÁGINA
Tabela IV.1 – Características do modelo físico e do sistema de injeção de gás.....	48
Tabela IV.2 – Configurações de vazões de gás na perna de subida e na câmara de vácuo.....	54
Tabela IV.3 – Localizações dos eletrodos de pH e temperatura.....	55
Tabela V.1 – Resultados da injeção de gás na câmara de vácuo com bicos de injeção de gás com diâmetro de 1 e 1,5 milímetros.....	67
Tabela V.2 – Resultados da injeção de gás na câmara de vácuo com bicos de diâmetros de 2,2 e 2,8 milímetros.....	68
Tabela V.3 – Avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de massa para bicos de 1 milímetro na câmara de vácuo e bicos de 1 e 1,5 milímetros na perna de subida.....	80
Tabela V.4 – Avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de massa para bicos de 1 milímetro na câmara de vácuo e bicos de 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida.....	81
Tabela V.5 – Avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de massa para bicos de 1,5 milímetro na câmara de vácuo e bicos de 1 e 1,5 milímetros na perna de subida.....	84
Tabela V.6 – Avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de massa para bicos de 1,5 milímetro na câmara de vácuo e bicos de 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida.....	85
Tabela V.7 – Avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de massa para bicos de 2,2 milímetro na câmara de vácuo e bicos de 1 e 1,5 milímetros na perna de subida.....	87
Tabela V.8 – Avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de massa para bicos de 2,2 milímetro na câmara de vácuo e bicos de 2,2, e 2,8 milímetros na perna de subida.....	88
Tabela V.9 – Avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de massa para bicos de 2,8 milímetros na câmara de vácuo e bicos de 1 e 1,5 milímetros na perna de subida.....	90
Tabela V.10 – Valores do coeficiente de transferência de massa, constante	

cinética, taxa de circulação e a porcentagem de área na câmara de vácuo para bicos de 2,8 milímetro na câmara de vácuo e bicos de 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida.....	91
--	----

RESUMO

A demanda de aços ultrabaixo carbono e aços livres de intersticiais aumentou significativamente nos últimos anos. Estes tipos de aços têm encontrado larga aplicação, principalmente na indústria automotiva.

Os processos de refino a vácuo são essenciais na fabricação destes aços de alta qualidade, e o processo RH se destaca, devido à sua alta produtividade. O princípio do degaseificador RH consiste na circulação do aço líquido entre a panela e uma câmara onde se faz vácuo. Neste processo, a intensidade da circulação do aço afeta não só a velocidade das reações, como também a taxa de homogeneização do material na panela.

No presente trabalho foi desenvolvido um estudo para avaliar as taxas de circulação e de descarburização em um reator RH, analisando o efeito da injeção de gás na base da câmara de vácuo, injeção de gás na perna de subida e do diâmetro dos bicos de injeção. A reação de descarburização foi simulada através da reação de dessorção de CO_2 em soluções alcalinas. Esse estudo foi feito empregando um modelo físico em escala 1:5 em relação ao equipamento industrial da USIMINAS (Usina Siderúrgica de Minas Gerais) localizado em Ipatinga-MG.

Os resultados encontrados evidenciaram os efeitos da injeção na câmara de vácuo para varias configurações de bicos e vazões de gás, na taxa de circulação e na cinética de descarburização. Os resultados do estudo cinético foram analisados usando um modelo de controle por transferência de massa. A melhor configuração obtida na taxa de descarburização foi para bicos com diâmetros de 1 milímetro na perna de subida e 1 milímetro na câmara de vácuo. A condição de melhora na taxa de descarburização foi utilizando bicos de menores diâmetros e baixas vazões na câmara de vácuo. Observou-se o coeficiente volumétrico de transferência de massa juntamente com a taxa de circulação, determinam a taxa de reação de descarburização.

ABSTRACT

Steels with low concentrations of nitrogen, hydrogen and carbon have in large demand lately. The RH process is a secondary refining process that can simultaneously attain significant levels of removal of these interstitial elements from liquid steel.

In the RH process, the melt circulation rate plays a very important role in determining productivity of the equipment, since it affects the decarburization rate.

In the present work, a physical model of a RH degasser in a 1:5 scale of an industrial reactor has been built and used in the study of the circulation rate and of the kinetics of decarburization. The effects of the gas flow rate and of the configurations of the nozzles used in the injection of the gas have been analyzed. The effect of gas injection in the vacuum chamber was also investigated.

The decarburization reaction of liquid steel was simulated using a reaction involving CO_2 and caustic solutions. The concentration of CO_2 in the solution was evaluated using pH measurements.

The experimental results indicated that the kinetic of decarburization is controlled by mass transfer in the liquid phase. It was also observed that, in certain configurations, the injection of gas in the vacuum chamber can increase the decarburization rate.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade do aumento da produtividade, redução de custos e fabricação de aços com exigências de qualidade cada vez mais severas, conduziu o desenvolvimento de processos de refino secundário dos aços, propiciando aos processos de refino primário se dedicarem mais intensivamente à tarefa de fusão e elaboração do aço primário. O refino secundário do aço tem como finalidade a adição de ligas ao aço, aquecimento do banho metálico, remoção de inclusões não-metálicas do aço, homogeneização do banho metálico, ajuste fino da composição: C, P, N, H, O e S. Em suma, os processos de refino secundário dos aços dão à aciaria uma enorme flexibilidade, e podem ser classificados em processos com e sem aplicação de vácuo.

Os processos de refino a vácuo são essenciais na fabricação de aços de alta qualidade, particularmente dos aços livres de intersticiais (“interstitial free”) - IF e os aços ultrabaixo carbono (“ultra low carbon”) - ULC, com teores de carbono na faixa de 30 ppm, que têm encontrado larga aplicação, principalmente na indústria automobilística.

Dentre os processos de refino a vácuo, destaca-se o processo RH, devido à sua alta produtividade. O princípio do desgaseificador RH consiste na circulação do aço líquido entre a panela e uma câmara onde se faz vácuo. O fluxo do aço é feito por dois dutos que fazem a ligação entre a panela e a câmara de vácuo, sendo um para a subida e outro para a descida do aço líquido, sendo chamados de perna de subida e perna de descida, respectivamente. Neste processo, a intensidade da circulação do aço afeta não só a velocidade das reações, como também a taxa de homogeneização do material na panela e em outra análise, a produtividade do equipamento.

O processo RH tem sofrido mudanças contínuas, com vista à obtenção de maiores índices de qualidade, maiores graus de limpidez, melhor controle da composição química final, mais produtividade e baixos custos, sem que altere drasticamente a rotina da usina.

Características importantes, tais como: tamanho, forma, população e distribuição espacial das bolhas na região superior da perna de subida de aço líquido no RH, “Pluma Gasosa no RH”, as características de mistura do aço líquido no vaso a vácuo, sob ponto de vista cinético, são importantes e imprescindíveis para a compreensão e quantificação do comportamento da desgaseificação nesta modalidade de reator.

No presente trabalho foi desenvolvido um estudo para avaliar as taxas de circulação e de descarburização em um reator RH, analisando o efeito da injeção de gás na base da câmara de vácuo, injeção de gás na perna de subida e do diâmetro dos bicos de injeção.

Para o estimar a taxa de circulação do aço líquido no desgaseificador RH, foi utilizada uma técnica que envolve a obtenção de curvas de distribuição de tempos de homogeneização de soluções salinas. Já para a cinética de descarburização, foi estudada a reação de descarburização através da dessorção de CO_2 em soluções alcalinas, pela injeção de ar na base da perna de subida e na base da câmara de vácuo no entorno da perna de subida.

Esse estudo foi feito empregando um modelo físico similar ao equipamento industrial usado em usinas siderúrgicas. Este modelo foi construído em acrílico, em escala 1:5 em relação ao desgaseificador RH da USIMINAS no estado de Minas Gerais.

2. OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho são:

1. Análise do efeito da injeção de gás na câmara de vácuo sobre as taxas de descarburização e de circulação;
2. Análise do efeito do diâmetro dos bicos de injeção sobre as taxas de descarburização e circulação.

Com este estudo, espera-se identificar alternativas que possibilitem ganhos adicionais de produtividade em reatores RH.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitos estudos para a melhora das propriedades do aço têm sido realizados, buscando uma diminuição na quantidade de inclusões não metálicas, nos teores de gases dissolvidos, visando um maior índice de limpidez. Com o propósito de um melhor entendimento dos princípios do processo RH, será apresentado neste item um breve histórico, características e uma análise termodinâmica deste processo. Em seguida serão discutidos o conceito de taxa de circulação e as características que influenciam na mesma, bem como métodos de sua obtenção em escala laboratorial. Estudos sobre a cinética de descarburização também serão apresentados e discutidos, incluindo um modelo matemático para quantificação desta cinética. Finalmente, será apresentado um breve estudo da dessorção de dióxido de carbono da água. Essa reação foi utilizada para simular a descarburização do aço nos ensaios com o modelo físico. Essa similaridade ocorre nos períodos onde a taxa de reação é controlada pela difusão do carbono no aço.

3.1. Histórico do Processo RH

O processo RH é relativamente novo se comparado aos processos siderúrgicos já consagrados. Williams propôs, em 1931, um método de desgaseificação a vácuo, baseado em uma sugestão de Henry Bessemer, no qual o aço seria desgaseificado em um molde de lingotamento (Hahn et al, 1997).

Lorenz em 1957, com base na proposta de Williams, propôs na Alemanha um modelo de desgaseificador conhecido como patente de A. Lorenz.

Testes realizados em modelos físicos baseados na patente de A. Lorenz, na Usina Ruhrstahl Heinrichshutte, na cidade de Hattingem e na Companhia Heraeus, deram ao desgaseificador RH este nome, por representar as iniciais das duas companhias que o desenvolveram.

Após pesquisas realizadas pelas empresas Thyssen e Heraeus, foi construída uma instalação piloto de 70 t de aço em 1958. Esta instalação entrou em operação em 1959.

O RH, a partir do início de sua operação, sofreu várias mudanças em relação às suas características físicas, em relação à metalurgia (descarburização, desnitração, etc.) e principalmente em seus sistemas periféricos (sistemas de vácuo, controle, etc.), possibilitando, atualmente, o tratamento de panelas com mais de 300 t de aço líquido e alcançando mais de 11 m de altura do vaso de reação.

Uma das evoluções ocorridas no processo RH foi à instalação de lança de oxigênio no interior do vaso superior, com o objetivo de auxiliar a descarburização. Outras funções importantes deste tipo de acessório são a de fornecimento complementar de calor através de reações exotérmicas do Al (adição controlada efetuada para controle térmico) formando Al_2O_3 e da pós-combustão de CO em CO_2 . No caso da CST, a tecnologia empregada foi a KTB, da Kawasaki Steel Corporation (Kawasaki Top Oxygen Blowing) (Ehara et al, 1997).

3.2. Características do Processo RH

O processo de recirculação do desgaseificador RH está representado esquematicamente na figura 3.1. Neste processo o aço líquido, contido em uma panela, é sugado através de um “snorkel” ou perna de subida e passa por um vaso parcialmente evacuado. A exposição contínua do metal à câmara de vácuo é alcançada pela injeção de argônio gasoso no interior da perna de subida para induzir a circulação do metal. A circulação padrão se completará quando o metal exposto ao vácuo passar pelo segundo “snorkel” ou perna de descida de volta à panela.

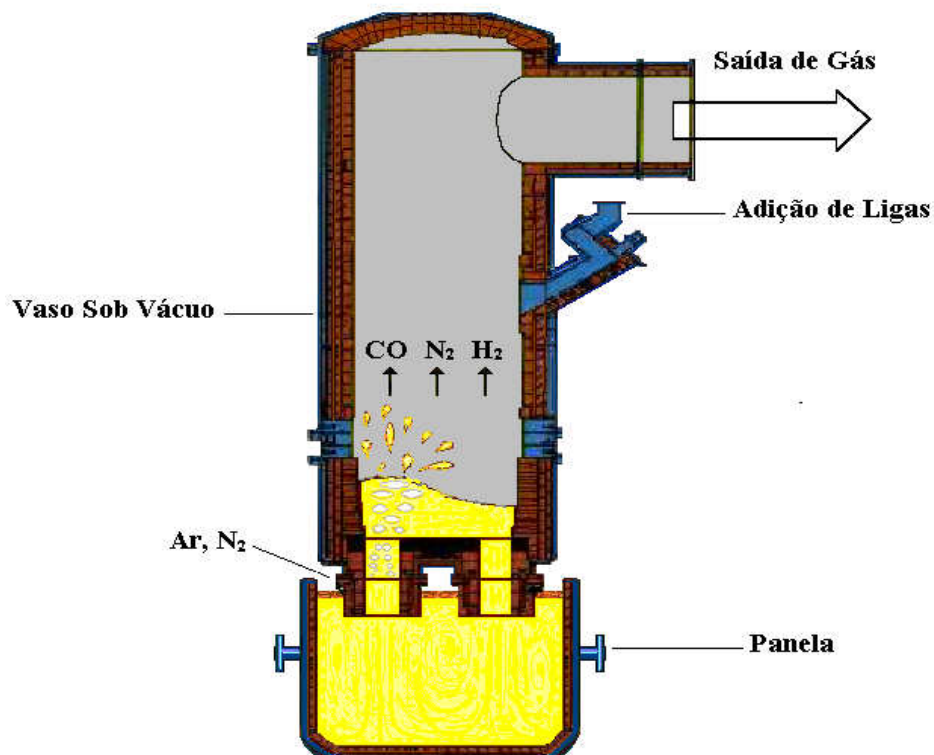
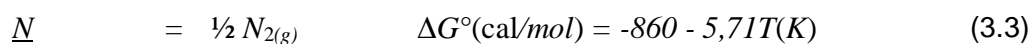
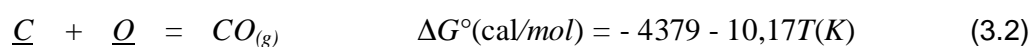
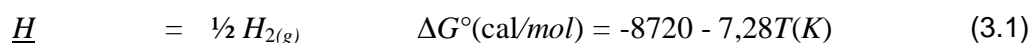


Figura 3.1 – Visão esquemática do processo – RH (Almeida et al, 2005).

Durante o processo, o carbono no aço combina-se com o oxigênio dissolvido para formar monóxido de carbono, sendo a reação acelerada sob condições de vácuo. A taxa de descarburização aumenta quando a pressão é reduzida e quando a área de reação e taxa de circulação são aumentados. Além da descarburização e desoxidação, ocorre também a desgaseificação (redução dos teores de N e H) do aço líquido. Considerando o desgaseificador RH como um reator de mistura perfeita, se espera que ocorra uma homogeneização tanto térmica quanto química, e a flotação de inclusões não-metálicas devido à recirculação do aço líquido.

3.3. Análise Termodinâmica das Reações do Processo RH

Sob o ponto de vista termodinâmico, as reações de desgaseificação apresentam uma forte dependência da pressão, pois ocorrem com desprendimento de produtos gasosos. A redução da pressão parcial na câmara de vácuo favorece a eliminação de hidrogênio e nitrogênio e a descarburização (Carvalho et al, 1977). As reações relevantes são:



As constantes de equilíbrio das reações são, respectivamente:

$$K_{eq}^{(3.1)} = (P_{H_2})^{1/2} / h_H \quad (3.4)$$

$$K_{eq}^{(3.2)} = P_{CO} / h_C \cdot h_O \quad (3.5)$$

$$K_{eq}^{(3.3)} = (P_{N_2})^{1/2} / h_N \quad (3.6)$$

onde:

K_{eq} = constante de equilíbrio da equação;

P_{CO} = pressão parcial do monóxido de carbono gasoso (atm);

P_{H_2} = pressão parcial do hidrogênio gasoso (atm);

P_{N_2} = pressão parcial do nitrogênio gasoso (atm);

h_C = atividade henryana do carbono no aço;

h_O = atividade henryana do oxigênio no aço;

h_H = atividade henryana do hidrogênio no aço;

h_N = atividade henryana do nitrogênio no aço.

No caso da descarburização, a constante de equilíbrio ($K_{eq}^{(3.2)}$) é expressa pela equação 3.5. Estas atividades crescem com a elevação dos teores de carbono e oxigênio no aço. Sendo $K_{eq}^{(3.2)}$ uma constante para uma dada temperatura, quanto menor a pressão parcial de CO, menores serão os teores de carbono e oxigênio em equilíbrio. Essa relação pode ser expressa por:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln \left[\frac{P_{CO}}{(f_C \cdot \%C) \cdot (f_O \cdot \%O)} \right] \quad (3.7)$$

$$\frac{2203,6}{T} + 5,12 = \ln \left[\frac{P_{CO}}{(f_C) \cdot (f_O \cdot \%O)} \right] - \ln \%C \quad (3.8)$$

$$\ln \%C = \ln \left[\frac{P_{CO}}{(f_C) \cdot (f_O \cdot \%O)} \right] - \frac{2203,6}{T} - 5,12 \quad (3.9)$$

onde:

f_C = coeficiente de atividade henryano do carbono;

f_O = coeficiente de atividade henryano do oxigênio.

Plotando um gráfico teórico da equação (3.9), chega-se à figura 3.2, onde é apresentado um diagrama de equilíbrio para a reação de descarburização. É visto que uma redução na pressão total de monóxido de carbono para a reação em questão fará com que menores teores, tanto de oxigênio quanto de carbono, sejam obtidos.

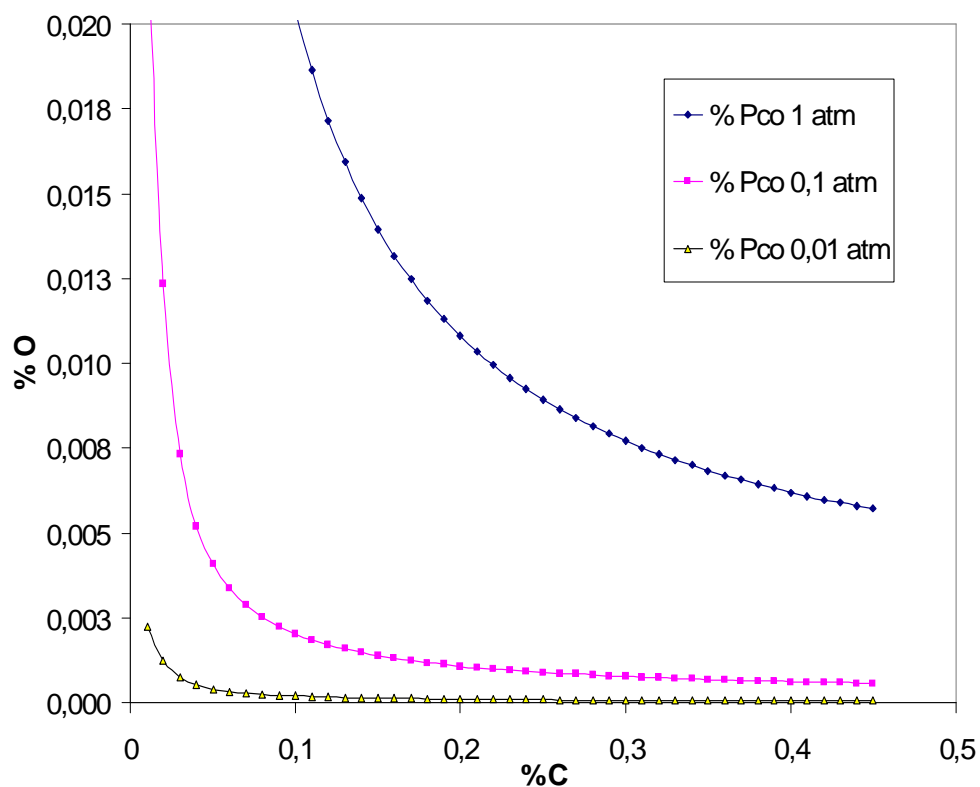


Figura 3.2 – Relação %C x %O com temperatura constante ($T = 1600^{\circ}\text{C}$).

Procedendo de forma similar para as reações 3.1 e 3.2, obtêm-se as seguintes expressões:

$$\Delta G^{\circ} = -RT \ln \left[\frac{(P_{H_2})^{1/2}}{(f_H \cdot \%H)} \right] \quad (3.10)$$

$$\frac{4388,08}{T} + 3,66 = \ln \left[\frac{(P_{H_2})^{1/2}}{(f_H)} \right] - \ln \%H \quad (3.11)$$

$$\ln \%H = 1/2 \ln(P_{H_2}) - \ln f_H - \frac{4388,08}{T} - 3,66 \quad (3.12)$$

onde :

f_H = coeficiente de atividade henryano do hidrogênio.

$$\Delta G^\circ = -RT \ln \left[\frac{(P_{N_2})^{1/2}}{(f_N \cdot \%N)} \right] \quad (3.13)$$

$$\frac{432,77}{T} + 2,87 = \ln \left[\frac{(P_{N_2})^{1/2}}{(f_N)} \right] - \ln \%N \quad (3.14)$$

$$\ln \%N = 1/2 \ln(P_{N_2}) - \ln f_N - \frac{432,77}{T} - 2,87 \quad (3.15)$$

onde:

f_N = coeficiente de atividade henryano do nitrogênio.

Para ambos equacionamentos, os teores dos elementos dissolvidos no aço se relacionam com a raiz quadrada da pressão:

$$\%i \propto \sqrt{P_i} \quad (3.16)$$

Onde %i representa o teor do elemento e P_i a pressão parcial do respectivo gás.

3.4. Taxa de Circulação

A taxa de circulação de líquido em um desgaseificador RH pode ser entendida como a quantidade de aço que passa por um plano perpendicular à perna de descida por unidade de tempo.

Três técnicas têm sido usadas na avaliação da taxa de circulação em desgaseificadores RH:

- medições realizadas nas unidades industriais, normalmente utilizando injeções de traçadores (metais que não aparecem na composição dos aços) e avaliação de suas concentrações ao longo do tempo;
- ensaios com modelos físicos, também usando traçadores para acompanhamento do processo de mistura;
- modelagem matemática do escoamento do aço no processo.

A obtenção da taxa de circulação pode ser realizada na instalação industrial, avaliando o tempo de mistura de traçadores no sistema como um todo. Hanna et al (1992), Kitamura et al (2000), Park et al (2000), Ajmani et al (2004), entre outros, utilizaram cobre como traçador.

Vários autores utilizaram modelagem matemática em conjunto com modelo físico ou com testes industriais para estudar a taxa de circulação e o comportamento do fluxo do aço líquido no interior do desgaseificador RH, dentre eles se destacam Nakanishi et al (1975), Shirabe et al (1983), Seshadri e Costa (1986), Kato et al (1993), Miki et al (1997), Li et al (2000), Vargas (2000), Park et al (2000), Park et al (2003), Ajmani et al (2004), Li et al (2005), Seshadri et al (2007), entre outros.

Nakanishi et al (1975), a partir de um modelo físico construído em vidro na proporção de 1/20 de um RH da Chiba Works, utilizaram filmagens e serragem colorida injetada ao longo da perna de descida para calcular a taxa de circulação. Estes mesmos autores, a partir de ensaios realizados em escala industrial, utilizaram ouro radioativo como traçador em um desgaseificador RH de 150t. O traçador foi introduzido próximo à perna de subida, envolto por uma cápsula de alumínio, e sua radiação monitorada através de um sensor posicionado na região externa da perna de descida do desgaseificador RH. A figura 3.3 mostra os resultados obtidos da curva característica da concentração específica do traçador com o tempo de mistura. A concentração específica do traçador considera a razão da concentração de uma quantidade de traçador adicionado em relação à concentração deste traçador no equilíbrio inicial.

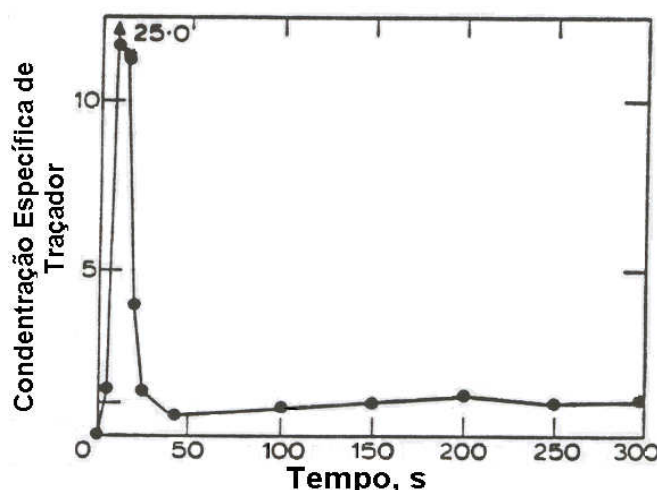


Figura 3.3 – Dispersão do ouro radiativo como traçador com o tempo (Nakanishi et al, 1975).

A partir dos dados experimentais, a taxa de circulação foi calculada pela relação 3.17:

$$\tilde{W} = U / S_p \quad (3.17)$$

sendo:

\tilde{W} = taxa de circulação do aço líquido (l.min⁻¹);

S_p = área do pico abaixo da curva característica (kg.min.l⁻¹);

U = massa do aço líquido na panela (kg).

Ajmani et al (2004) utilizaram ensaios na indústria, com injeção de cobre, para validar resultados obtidos na modelagem matemática. Com essa finalidade, 65kg de cobre puro (99,9%), cortado em pequenos pedaços, foram adicionados dentro da câmara de vácuo do desgaseificador RH, com uma panela de 130t de capacidade. Como o ponto de fusão do cobre é bem menor que do aço e o fluxo do líquido é muito turbulento, o cobre é misturado rapidamente ao aço na câmara de vácuo do desgaseificador RH. Para analisar a mudança no teor de cobre no aço líquido com o tempo, amostras de aço líquido foram retiradas manualmente da panela do RH em pequenos intervalos de tempo. A figura 3.4 mostra a comparação dos resultados do modelo matemático com o ensaio feito na planta. São apresentadas três curvas, sendo que, para as simulações com o modelo matemático, o ponto 1 (Pt. 1), representa o sensor posicionado próximo à base da câmara de vácuo entre as pernas dos desgaseificador RH e o ponto 2 (Pt. 2), representa o sensor ligeiramente acima do sensor no ponto 1. A terceira curva representa os testes feitos na planta industrial. Estes resultados mostram a variação da concentração adimensional do cobre (C_t/C_∞) com o tempo (t), considerando C_t a concentração de cobre no tempo t e C_∞ a concentração de cobre assumindo homogeneização perfeita. Observa-se que o pico de concentração medida na planta está próximo ao pico obtido para o ponto 1 e que o tempo de mistura previsto pelo modelo matemático está de acordo com os resultados obtidos na indústria.

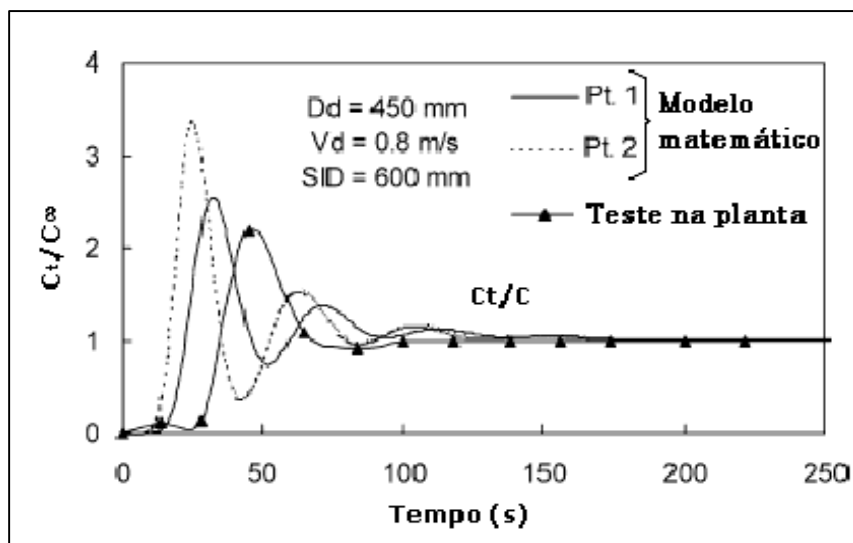


Figura 3.4 – Comparação da concentração de traçador no ponto 1 e no ponto 2 com o teste em planta, sendo D_d o diâmetro da perna de descida, V_d a velocidade média na perna de descida e SID a profundidade de imersão das pernas (Ajmani et al, 2004).

Park et al (2000) injetaram 125kg de cobre no desgaseificador RH quando a circulação do aço líquido dentro do equipamento estava constante e recolheram amostras do aço em espaços de tempo de 12 e 30 segundos, encontrando resultados de taxa de circulação próximos aos calculados com a equação empírica proposta por Kurokawa et al (1987). Estes mesmos autores utilizaram um modelo físico na escala de 1/10 em relação a um desgaseificador RH, onde puderam calcular a velocidade de pequenos balões cheios de água usando imagens seqüenciais na perna de descida. A figura 3.5 mostra a velocidade na perna descida medida por este método e os resultados do modelo matemático calculados por eles. Os resultados mostram que, enquanto a vazão de gás aumentou de 1,5l/min a 4,0l/min, a velocidade da água aumentou de 0,115m/s a 0,155m/s.

Kato et al (1993) utilizaram experimentos em um modelo físico de um desgaseificador RH na escala de 1:5, feito em material acrílico, para avaliar a taxa de circulação. Foi utilizado um tipo de hélice para medir velocidade do líquido, sendo a velocidade média que corta a seção transversal do fluxo na perna fixada em 0,35 m/s. O escoamento do líquido foi visualizado através de partículas de políestireno (0,001m de diâmetro, $1,04 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ de densidade) dispersadas na água.

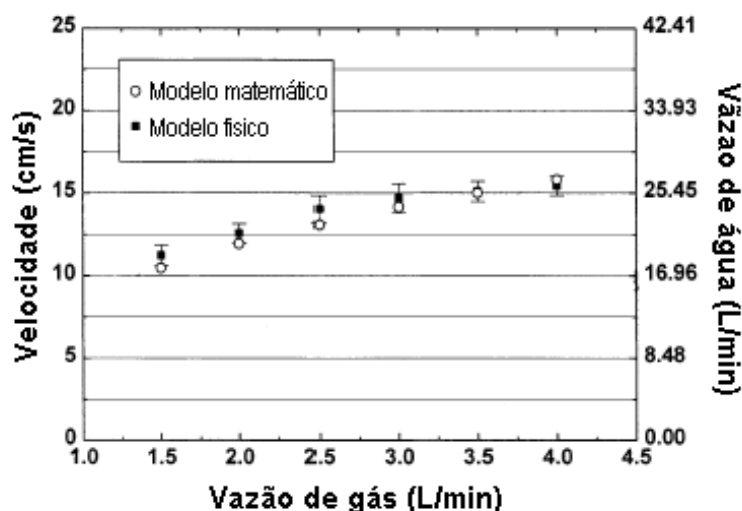


Figura 3.5 – Comparação das velocidades na perna de descida medidas no modelo físico e previstas pelo modelo matemático (Park et al, 2000).

Para avaliar a taxa de circulação do líquido em modelos físicos, é normalmente utilizada a injeção de traçadores (soluções salinas) e o acompanhamento de sua dispersão ao longo do tempo. Soluções de KCl foram utilizadas por vários autores (Seshadri e Costa, 1986; Vargas, 2000; Silva et al, 2004; Almeida et al, 2006; entre outros) para estudar o fenômeno de circulação no desgaseificador RH.

A seguir são apresentados e discutidos os efeitos de diversas variáveis sobre a taxa de circulação.

3.4.1. Efeito das variáveis sobre a taxa de circulação do aço

De acordo com Martins e Silva (2003), as características físicas que podem afetar a taxa de circulação são:

- Números e diâmetro interno de bicos de injeção;
- Diâmetro das pernas;
- Quantidade de pernas ascendentes (perna de subida);
- Profundidade de imersão dos bicos de injeção abaixo da superfície do líquido;
- Altura do aço na câmara de vácuo;
- Injeção auxiliar de gás (pernas, panela e câmara a vácuo);
- Vazão e distribuição de gás;

Os efeitos destas variáveis serão discutidos a seguir, assim como o efeito da aplicação de um campo magnético na perna de subida e da obstrução de bicos, simulando o seu entupimento.

3.4.1.1. Taxa de injeção de gás na perna de subida

Vários autores estudaram o efeito da vazão de gás na perna de subida na taxa de circulação, dentre eles pode-se destacar: Nakanishi et al (1975), Seshadri e Costa (1986), Hanna et al (1994), Park et al (2000), Li et al (2000), Park et al (2001), Almeida et al (2006), entre outros.

Nakanishi et al (1975), a partir de experimentos feitos na indústria para determinar as velocidades do líquido na entrada da perna de subida e saída na perna de descida, encontraram que a taxa de circulação cresce com o aumento da vazão de argônio na perna de subida.

Através de estudos realizados em um modelo físico com escala de 1:5 em relação ao desgaseificador RH industrial, Almeida et al (2006) utilizaram KCl como traçador para determinar a taxa de circulação, e com isso puderam avaliar o efeito da vazão de gás na perna de subida. A figura 3.6 ilustra alguns dos resultados obtidos. Observa-se que até uma dada vazão, o aumento da taxa de injeção de gás provoca um aumento na taxa de circulação. Isto se deve a um maior arraste do líquido pelo gás injetado. Para vazões mais altas, a taxa de circulação cai, pois a perna de subida passa a ser ocupada por um grande volume de gás e a quantidade de líquido arrastado tende a diminuir. Vargas (2000), também demonstrou o mesmo efeito, sendo identificada pelo autor uma vazão de gás crítica em que, a partir da qual não há incremento significativo.

Park et al (2000) utilizaram modelagem matemática para analisar o efeito da vazão de argônio na taxa de circulação de um desgaseificador RH. A figura 3.7 mostra a taxa de circulação para diferentes vazões de argônio gasoso. Com o aumento das vazões de gás, a taxa de circulação também aumenta; entretanto, observa-se que para vazões superiores a $220\text{Nm}^3/\text{h}$ há um decréscimo na taxa de circulação. Esta tendência é similar à encontrada nos ensaios com modelos físicos

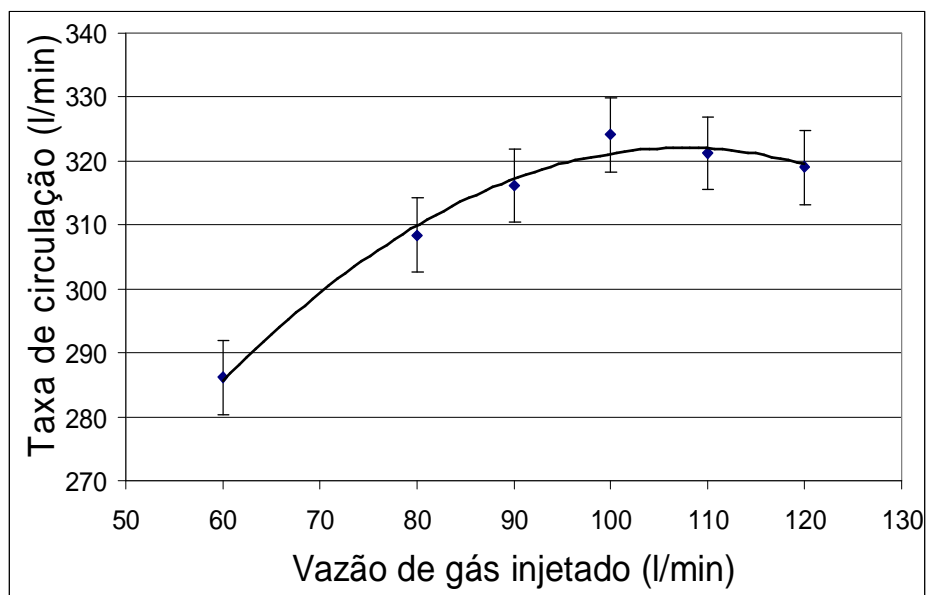


Figura 3.6 – Taxa de Circulação X Vazão de Gás (Almeida et al, 2006).

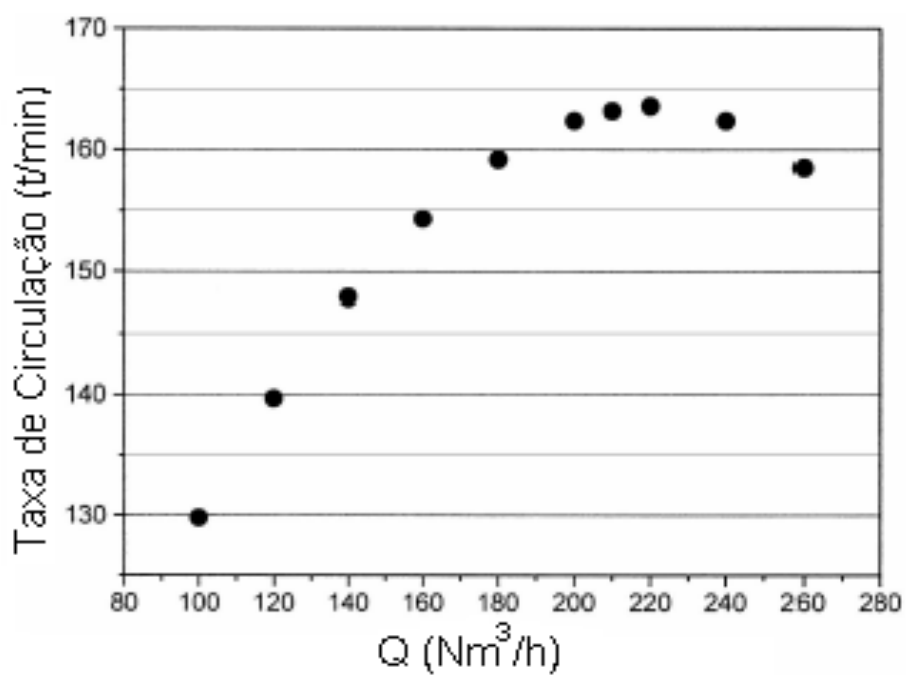


Figura 3.7 – Taxa de circulação em função da vazão de gás, Q (Park et al, 2000).

3.4.1.2. Taxa de injeção de gás no fundo da panela

De acordo com Silva et al (2004), a produtividade do desgaseificador RH depende da velocidade de circulação do aço. Segundo estes autores, a instalação de um *plug* poroso no fundo da panela pode auxiliar na flotação de inclusões, pelo aumento das taxas de circulação. Esse efeito foi mais significativo para baixas vazões de gás injetado na perna de subida, sendo que para altas vazões, a contribuição da injeção pelo *plug*, localizado no fundo da panela, foi menos significativa. A figura 3.8 mostra o aumento na taxa de circulação quando se injeta gás pelos *plugs* porosos situados no fundo da panela.

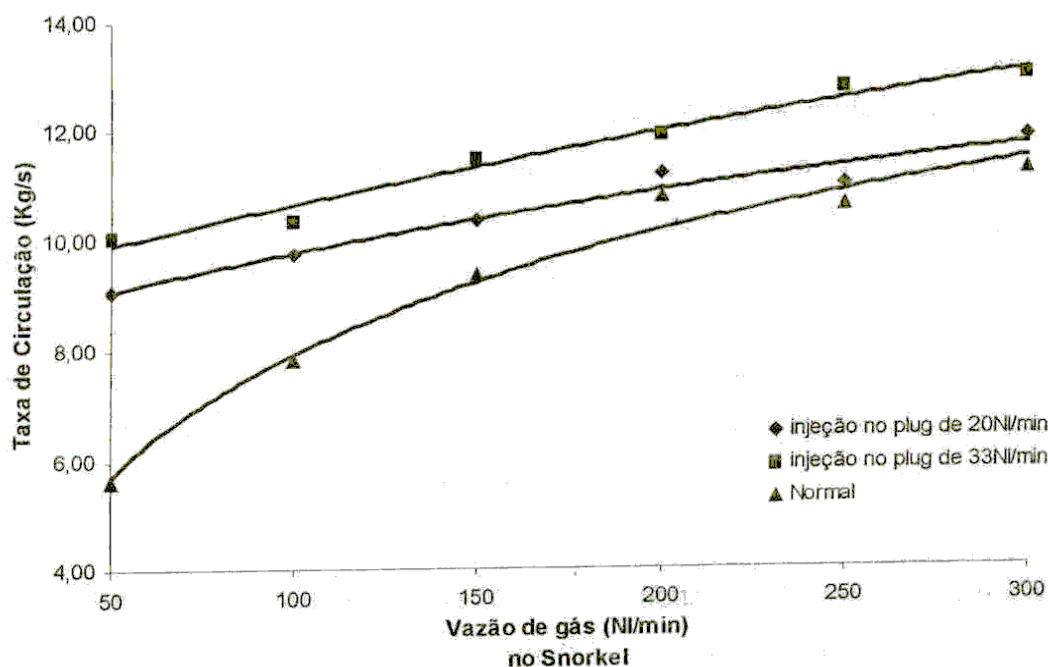


Figura 3.8 – Efeito da injeção do gás, pelo fundo da panela, sobre a taxa de circulação do metal líquido (Silva et al, 2004).

3.4.1.3. Diâmetro das pernas de descida e subida

Hanna et al (1992) notaram que a taxa de circulação aumenta com o aumento do diâmetro das pernas, considerando uma vazão constante de gás injetado. De acordo com seus resultados, foi observado um aumento de 10% na taxa de circulação quando os diâmetros das pernas foram aumentadas de 100 mm para 110 mm.

Kondo et al (1992), a partir de experimentos realizados na aciaria 3 da usina de Chiba Work's no Japão, aumentaram o diâmetro interno das pernas de um desgaseificador RH e assim obtiveram um aumento da taxa de circulação. A figura 3.9 apresenta resultados desses autores, ilustrando o efeito da área da seção transversal das pernas na taxa de circulação.

Takahashi et al (1995), Vargas (2000), entre outros, também observaram o efeito positivo do aumento do diâmetro das pernas sobre a taxa de circulação.

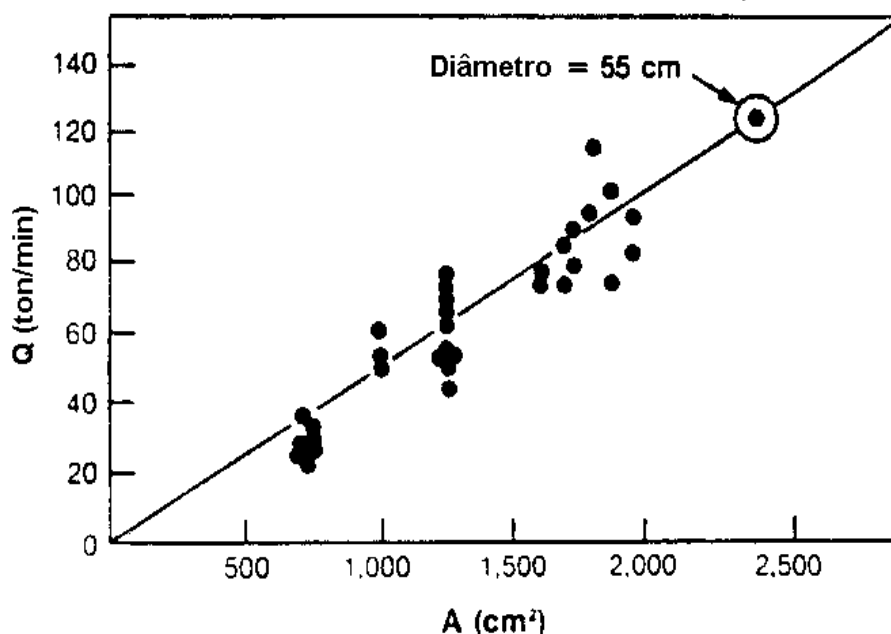


Figura 3.9 – Relação entre a taxa de circulação e a área da seção transversal das pernas (Kondo et al, 1992).

3.4.1.4. Número de pernas

Obata et al (1999), utilizando experimentos com modelos físicos, propuseram uma nova câmara de vácuo com multipernas. A viabilidade desta proposta foi comprovada pela modelagem matemática realizada por Li e Tzukhashi (2000). Neste sistema, a perna de descida é colocada no centro da panela e três pernas de subida são utilizadas para injeção de gás. Esse novo modelo foi comparado com um outro modelo simples com duas pernas apenas, apresentados na figura 3.10. Cálculos da taxa de circulação foram conduzidos para sistemas com duas e quatro pernas, com vazões de ar na faixa de 5 a 35 l/min. A distribuição de velocidades na perna de descida dos dois modelos também foi computada.

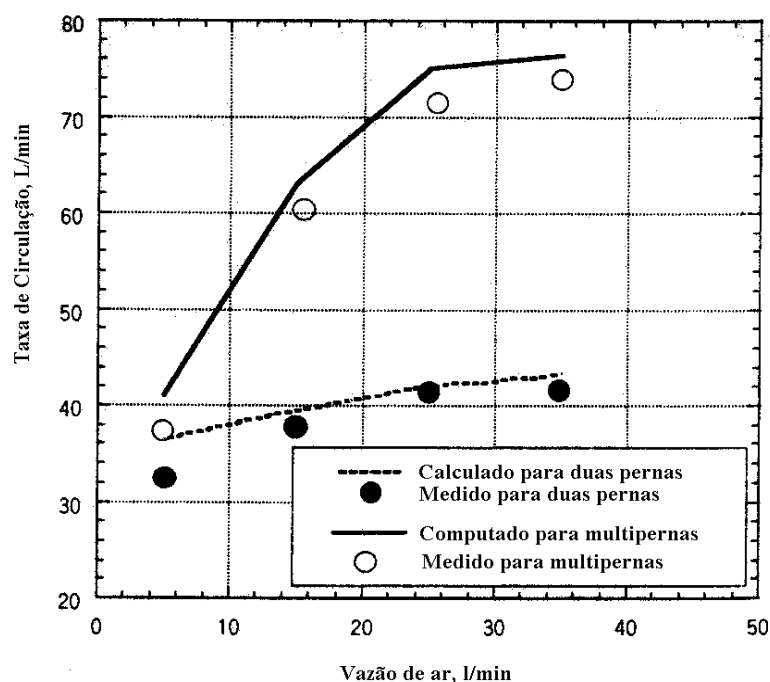


Figura 3.11 – Efeito da vazão de ar nas taxas de circulação do modelo físico de um vaso desgaseificador RH (Li et al, 2000).

Ainda levando em consideração o número de pernas, um novo processo baseado no desgaseificador RH foi estudado e desenvolvido por Kitamura et al (2000), sendo este processo nomeado de REDA (Revolutionary degassing activator). A viabilidade deste processo foi confirmada através de testes e consiste de uma larga perna imersa no aço e com injeção no fundo da panela. Estes testes industriais foram realizados usando 175t de aço na aciaria nº 1 e 350t de aço na aciaria nº 3 da usina de Yawata situada no Japão. A taxa de circulação foi determinada através de medidas de tempo de mistura perfeita através da adição de cobre. A figura 3.12 mostra os resultados de cálculos da taxa de circulação em função da vazão de argônio, para o REDA com capacidade de 350 toneladas e dois desgaseificadores RH, ambos com capacidade de 300 toneladas de aço líquido, sendo um com as pernas de diâmetro de 1000mm e o outro de 750mm. Segundo os autores, no processo REDA uma baixa vazão de argônio permite obter taxa de recirculação igual à do RH, porque a agitação promovida pelo gás que é injetado numa porção mais profunda do banho é maior.

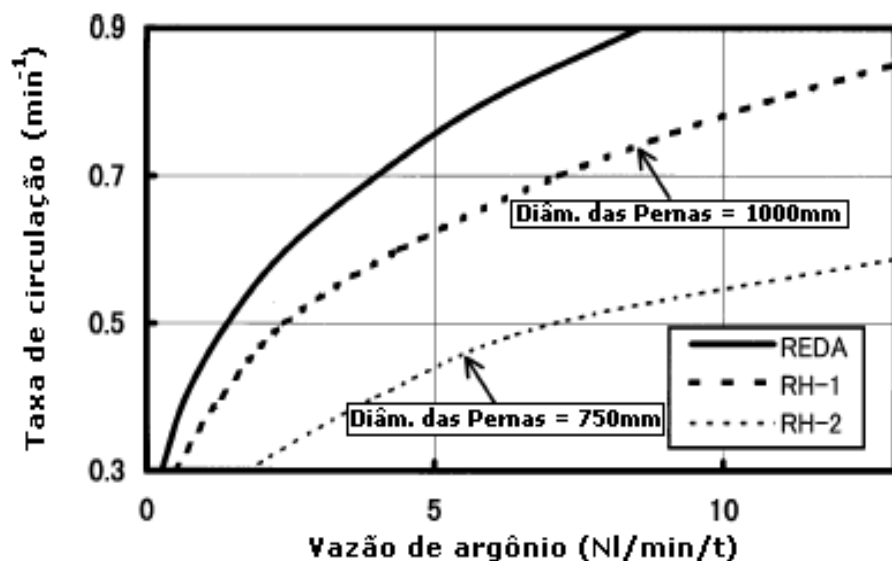


Figura 3.12 – Taxa de circulação do RH e REDA (Kitamura et al, 2000).

3.4.1.5. Número e diâmetro de bicos de injeção

Hanna et al (1992) fizeram estudos, onde se analisou o efeito do número de bicos em um modelo físico na planta de Llawern. Valores da taxa de circulação para vários números de bicos na perna de subida são apresentados na figura 3.13. Observou-se que um aumento no número de bicos de 4 para 8 levou ao aumento na taxa de circulação. A partir desse valor, a taxa de circulação tende a estabilizar ou decrescer ligeiramente. Park et al (2001) também investigaram o efeito do número de bicos utilizando modelagem matemática. Para isso, variou-se o número de bicos na faixa de 6 a 24, mantendo a pressão de vácuo constante (1333,2Pa), o diâmetro de 0,73m nas pernas e as vazões de gás de 0,042Nm³/s e de 0,056Nm³/s. Para ambas as vazões, a taxa de circulação tendeu a se elevar, quando se variou a quantidade de bicos de 6 a 14. Entre 14 e 16 bicos, a taxa de circulação tendeu a se estabilizar e a partir de 16 bicos a taxa de circulação se manteve constante.

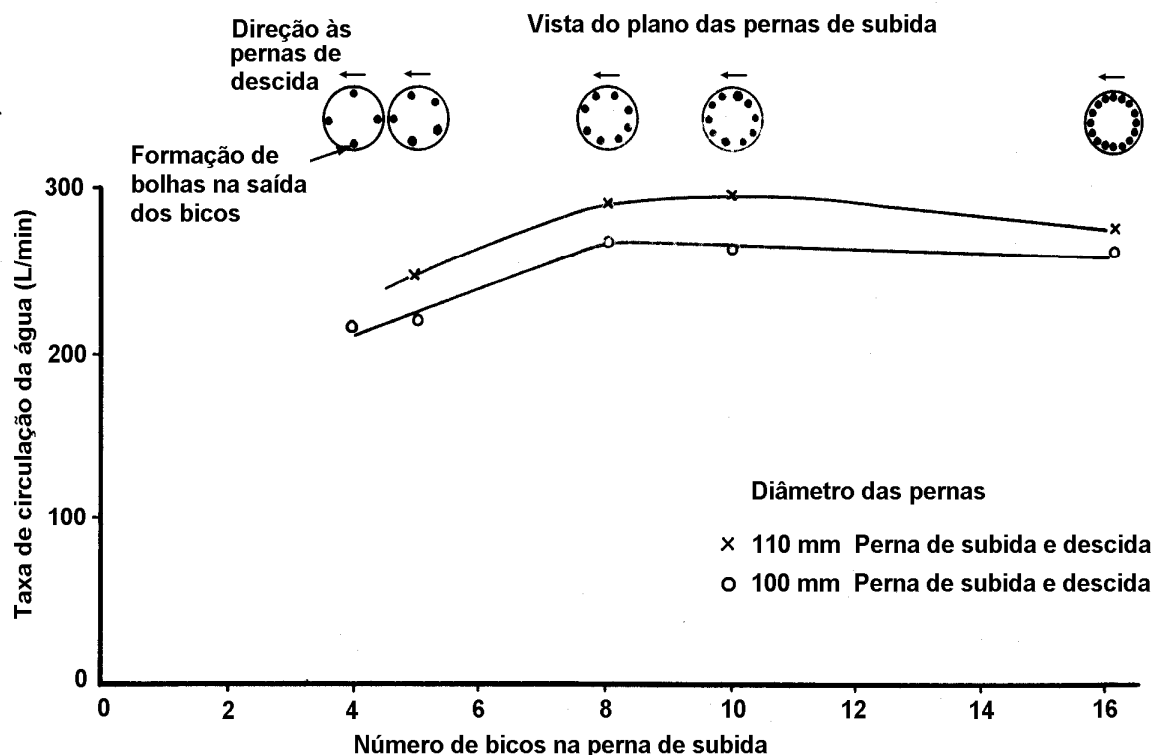


Figura 3.13 – Medidas da taxa de circulação no modelo de desgaseificador de Llawern para vários números de bicos na perna de subida (Hanna, 1992).

Nakanishi et al (1975) utilizaram um modelo físico construído em vidro para investigar os efeitos do número e diâmetro dos bicos de injeção. Para isso eles utilizaram água e parafina com injeção de argônio gasoso e como traçador utilizaram tinta vermelha. Para o sistema com água, os autores estudaram os efeitos do número e o diâmetro dos bicos de injeção, e encontraram que a taxa de circulação se eleva com aumento do número de bicos. Foi observado que à medida que o diâmetro dos bicos aumenta, para um único bico de injeção, a taxa de circulação tende a diminuir. Para o sistema utilizando parafina, em comparação com o sistema utilizando água, Nakanishi et al (1975) observaram o comportamento da dispersão do traçador, sendo que no sistema utilizando água, a mistura perfeita do traçador no aparato experimental ocorreu para o bico com 1mm de diâmetro com número de Reynolds por volta de 1000. Com a utilização de parafina, o traçador não obteve boa penetração na panela ficando restrito à sua parte superior. Os autores alegaram que isso ocorreu devido à alta viscosidade da parafina, não permitindo o traçador alcançar o fundo da panela.

Almeida et al (2006), utilizando um modelo físico, avaliaram o efeito da vazão de gás na faixa de 50 – 500 Nl/min, com bicos de diâmetro de 1,0; 1,5; 2,2 e 2,8mm. Para uma dada vazão, há uma tendência da taxa de circulação aumentar quando os diâmetros dos bicos aumentam.

3.4.1.6. Nível dos bicos na perna de subida e profundidade do banho na câmara de vácuo

Hanna et al (1992) demonstraram que com a injeção em diferentes pontos da perna de subida, ocorre uma diminuição na taxa de circulação à medida que o nível dos bicos de injeção é elevado. Para dois níveis de injeção, um mais alto e um mais baixo, mostrou-se que os jatos penetraram mais nas pernas no nível mais baixo que no mais alto. Este efeito foi explicado pelos autores, considerando que as bolhas no nível mais baixo interagem com o desenvolvimento das bolhas de nível mais alto. Seshadri e Costa (1986) e Kamata et al (1998), utilizando testes em escala industrial, observaram que os maiores valores de taxa de circulação podem ser observados quando os pontos de injeção estão localizados na posição mais baixa da perna de subida. Seshadri e Costa (1986) sugerem que a injeção de gás na perna de subida deve ser a mais baixa possível, pois à medida que o ponto de injeção decresce na perna de subida, a coluna de líquido aumenta, e assim, ocorre um melhor aproveitamento da transferência de energia do gás para o líquido.

3.4.1.7. Obstrução dos bicos de injeção

Silva et al (2004), usando um modelo físico em escala 1:5 de uma unidade RH da CST (Companhia Siderúrgica de Tubarão), estudaram a influência da vazão de gás na perna de subida e da injeção simultânea de gás no fundo da panela, bem como a influência do entupimento de bicos na taxa de circulação.

Foram estudadas duas modalidades de bloqueio dos bicos, com dois níveis de injeção:

- (i) Bloqueio simétrico (4 bicos em cada nível de injeção, uniformemente distribuídos);
- (ii) Bloqueio assimétrico (4 bicos em cada nível de injeção, do lado da parede da panela);

A distribuição dos bicos pode ser vista na figura 3.14.

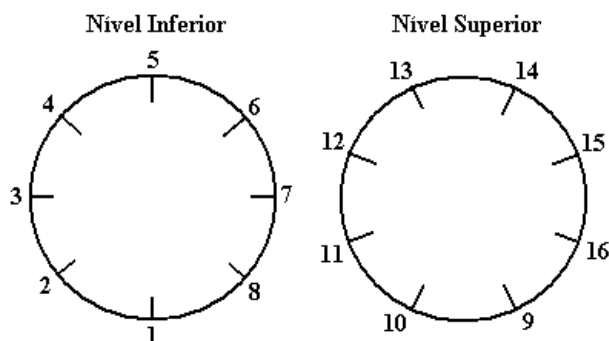


Figura 3.14 – Localização dos bicos (Bloqueio simétrico: bicos do nível inferior 2, 4, 6 e 8 e bicos do nível superior 9, 11, 13 e 15; Bloqueio assimétrico: bicos do nível inferior 1, 6, 7 e 8 e bicos do nível superior 9, 14, 15 e 16) (Silva et al, 2004).

Para o bloqueio simétrico foi observada uma redução na taxa de circulação para a vazão de gás por volta de 200NI/min. Isto é provavelmente o resultado de uma alta fração de gás na pluma, o que pode ser chamado de saturação na taxa de circulação. No caso do bloqueio assimétrico, foi constatado um decréscimo de 50% na taxa de circulação. Alguns resultados desse estudo podem ser vistos na figura. 3.15.

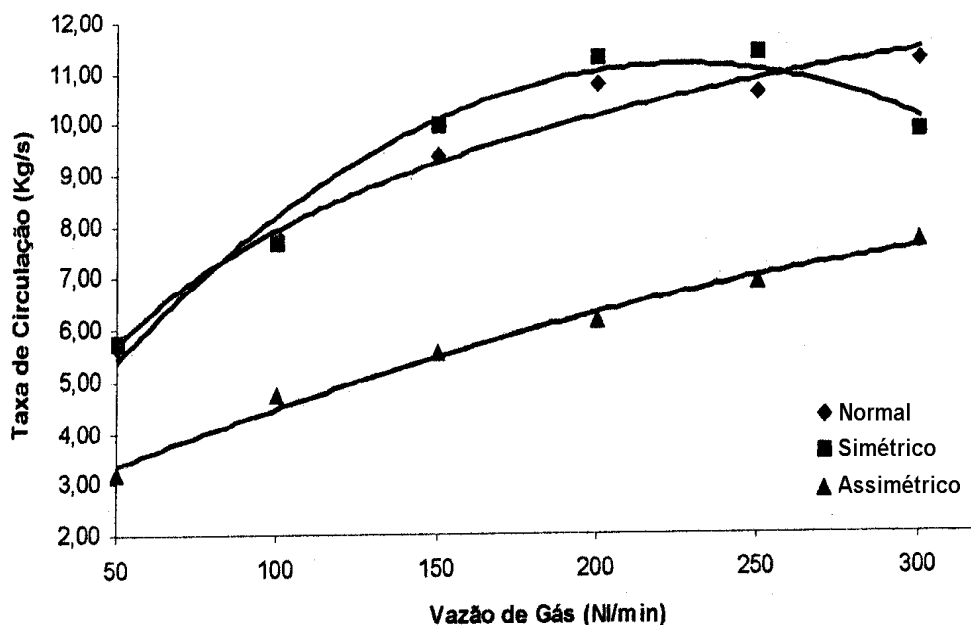


Figura 3.15 – Efeito da obstrução dos bicos de injeção sobre a taxa de circulação (Silva et al , 2004).

3.4.1.8. Efeito do campo magnético de rotação

Li e Tsukihashi (2005) aplicaram um campo magnético de rotação na perna de subida da câmara do RH para promover a remoção de inclusões não-metálicas do aço líquido e prolongar a vida do equipamento. Se o aço líquido está agitado na perna de subida pela ação do fluxo em forma de redemoinho, gerado pelo campo magnético, bolhas de argônio e inclusões não-metálicas contidas no aço, que possuem densidades menores que a densidade do aço líquido, são movidas em direção à área central da perna de subida pela diferença na força de centrífuga. O aumento das colisões e a coalescência entre bolhas de gás e inclusões faz com que ocorra uma melhora na taxa de remoção de inclusões. Modelos físico e matemático foram desenvolvidos para permitir uma melhor compreensão do escoamento turbulento bifásico, considerando o efeito do campo magnético de rotação. Com base na satisfação do critério de similaridade baseado nos números de Froude e Froude modificado, um modelo físico com escala de 1:7 usando água foi construído com resina acrílica. Foram usados dois rotores com lâminas planas para gerar o redemoinho e um sistema de vídeo para filmar as duas fases. Um medidor ultra-sônico foi usado para determinar a vazão do líquido na perna de descida. A figura 3.16 mostra o efeito do aumento da potência dos rotores para uma vazão constante de gás. Na figura 3.16(a), a subida das bolhas ocorre próximo às paredes da perna de subida e nota-se que não há bolhas na área central quando não tem aplicação do fluxo com redemoinho. À medida que se aumenta a potência nos rotores, como pode ser observado nas figuras 3.16(b) a 3.16(d), observa-se que as bolhas são deslocadas para a região central da perna de subida.

A figura 3.17 ilustra o efeito do aumento da potência dos rotores na taxa de circulação do vaso RH, considerando três vazões de injeção de gás. Como resultado, Li e Tsukihashi (2005) encontraram que à medida que se aumenta a potência dos rotores, ou seja, a rotação do fluido e conseqüentemente a concentração das bolhas na zona central da perna de subida, a taxa de circulação aumenta.

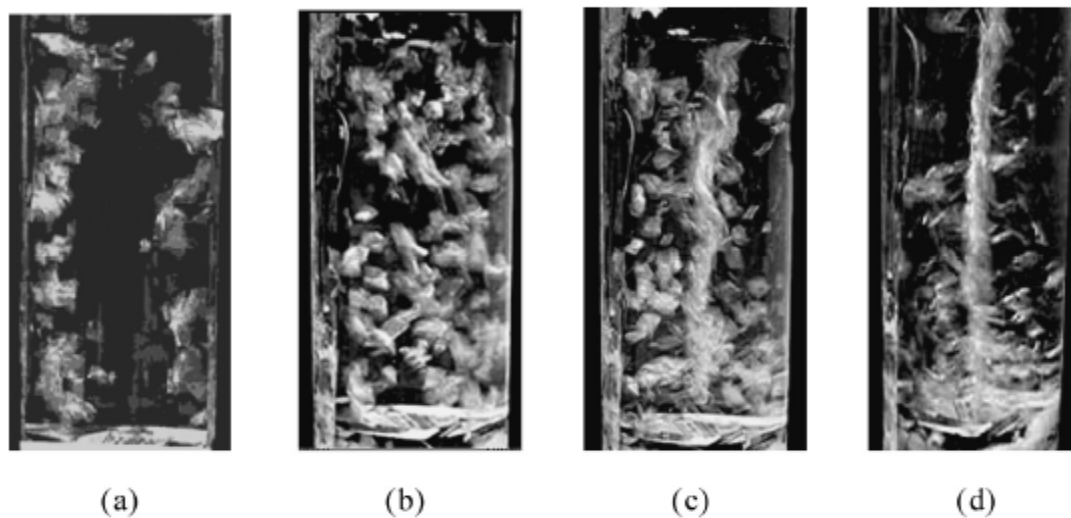


Figura 3.16 – Efeito do aumento da potência na distribuição das bolhas na perna de subida, $Q=0,5 \text{ m}^3/\text{h}$. a) 0W, b) 20 W, c) 25 W e d) 35 W (Li et al, 2005).

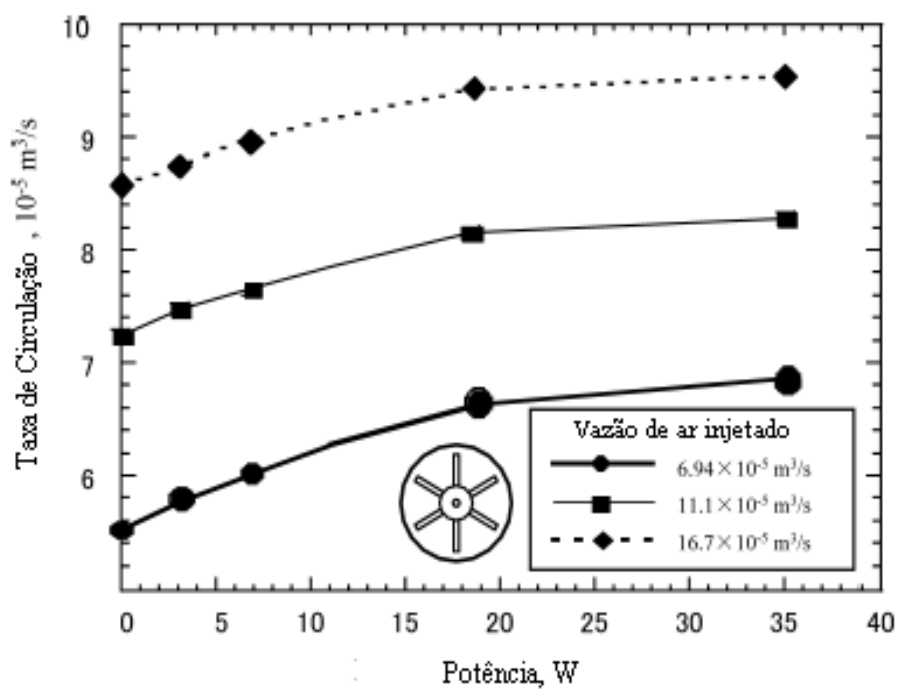


Figura 3.17 – Efeito do aumento da potência dos rotores na taxa de circulação para 3 vazões de ar (Li et al, 2005).

3.4 2. Expressões para cálculo da taxa de circulação

Alguns autores propuseram equações para a estimativa da taxa de circulação no processo RH utilizando correlações empíricas desenvolvidas através dos conceitos de balanço de energia em equipamentos industriais, dentre elas pode-se destacar:

- Equação de Watanabe et al (1966):

$$Q = 0,02 D_u^{1,5} G^{0,33} \quad (3.18)$$

- Equação de Ono et al (1981):

$$Q = 3,8 \times 10^{-3} D_u^{0,3} D_d^{1,1} G^{0,31} H^{0,533} \quad (3.19)$$

- Equação de Seshadri e Costa (1986):

$$Q = 5,89 G^{0,33} \quad (3.20)$$

- Equação de Kurokawa (1987):

$$Q = 2576,08 D^{4/3} W^{1/3} \tau^{-0,741} \quad (3.21)$$

- Equação de Kwabara et al (1988):

$$Q' = 11,4 D^{1,33} G^{0,33} (\ln(P_1 / P_2))^{0,33} \quad (3.22)$$

onde:

Q : taxa de circulação do aço ($\text{t} \cdot \text{min}^{-1}$);

Q' : taxa de circulação do aço ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$);

D : diâmetro interno das pernas (mm);

D_u : diâmetro interno da perna de subida (cm);

D_d : diâmetro interno da perna de descida (cm);

G : taxa total de injeção de gás inerte na perna de subida ($\text{NI} \cdot \text{min}^{-1}$);

H : profundidade de imersão dos bicos de injeção de gás na perna de subida em relação ao nível do aço na câmara de vácuo (cm);

W: massa do líquido na panela (kg);

τ : tempo total de mistura (s);

P_1 : pressão na câmara de vácuo (torr);

P_2 : pressão na perna de descida na linha dos bicos de injeção de gás (torr).

De acordo com as equações 3.18, 3.19, 3.21 e 3.22, o diâmetro das pernas tem um efeito pronunciado na taxa de circulação do aço. Segundo Seshadri e Costa (1986), a vazão de argônio é a variável que determina a taxa de circulação. Estes autores usaram apenas um diâmetro de pernas.

A equação derivada empiricamente por Ono et al (1981) considera a 'zona de pluma' (H). Este parâmetro foi avaliado como o comprimento da perna de subida acima do ponto de injeção de gás.

3.5. Cinética de Descarburização

Pesquisadores vêm realizando experimentos para determinar a relação da taxa de descarburização com a taxa de circulação, que em um primeiro momento estão diretamente ligadas. No processo RH, a taxa de descarburização possui um importante papel na determinação da produtividade do equipamento.

Segundo Guo e Irons (2000), a cinética de descarburização no RH pode ser dividida em 2 estágios. Durante o primeiro estágio, a pressão parcial de CO no equilíbrio com o carbono e o oxigênio é muito maior que a pressão parcial na câmara de vácuo. Desta forma, a descarburização ocorre no seio do aço líquido. Este fenômeno é denominado autonucleação. Durante o segundo estágio, a descarburização ocorre apenas na superfície exposta do metal para o vácuo. Desse modo, o valor da taxa de reação diminui comparado com o primeiro estágio. No segundo estágio, a difusão do carbono na fase líquida controla a taxa de descarburização.

Guo e Irons (2000) também mostraram que a reação de dessorção de $\text{CO}_{2\text{aq}}$ de soluções alcalinas pode ser usada para simular a descarburização na região de controle por difusão de carbono líquido (baixos teores de carbono). Na figura 3.18 observa-se que na faixa de pH entre 6 e 8,5, o $\text{CO}_{2\text{aq}}$ é a espécie que tem variações mais significativas em sua concentração em função do pH. Desta forma, a variação de pH pode ser usada para acompanhar a variação de concentração de $\text{CO}_{2\text{aq}}$ e, conseqüentemente, avaliar a taxa de dessorção de $\text{CO}_{2\text{aq}}$. Este é o princípio da simulação da descarburização através de modelos físicos.

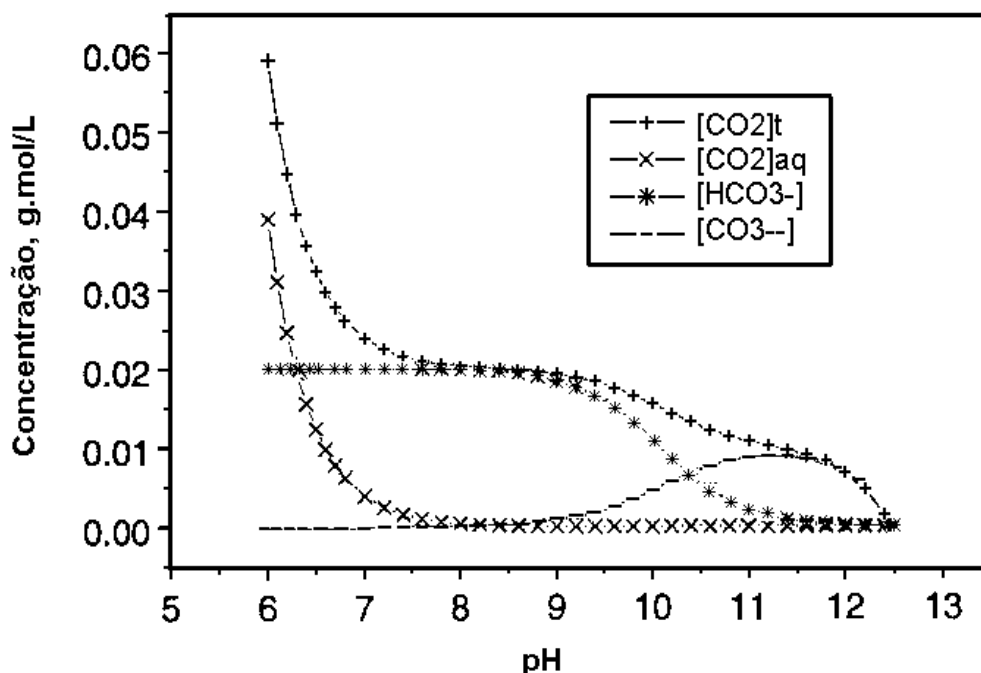


Figura 3.18 – Concentração das espécies do dióxido de carbono dissolvido em soluções aquosas versus pH (Guo e Irons, 2000).

Sakaguchi e Ito (1995) a partir de ensaios em um aparato experimental construído em acrílico estudaram a cinética de descarburização. O experimento consistia na injeção de CO_2 gasoso dentro da água deionizada até sua saturação. Em seguida, N_2 gasoso era injetado dentro do banho aquoso, sobre o qual se fazia vácuo, usando um orifício feito de latão situado no fundo da panela e a concentração de CO_2 aquoso medida continuamente. Estes autores determinaram que a cinética de descarburização segue uma equação de primeira ordem:

$$-\frac{dC}{dt} = \frac{Ak_L}{V_L} C \quad (3.23)$$

onde:

C = concentração de CO_2 aquoso, representando a concentração de carbono em um tempo determinado de injeção (mol/m^3);

A = área interfacial gás-líquido (m^2);

k_L = coeficiente de transferência de massa na fase líquida (m/s);

V_L = volume do banho (m^3);

A partir dos ensaios em que a concentração de CO_2 era monitorada, pode-se estimar o coeficiente volumétrico de transferência de massa (Ak_L/V_L).

A figura 3.19 mostra a variação da concentração de CO_2 aquoso com o tempo de injeção de N_2 , para várias pressões no interior do vaso. A razão da profundidade do banho pelo diâmetro do vaso, h/D , foi de 1,1 e a vazão de nitrogênio gasoso, Q_g , de 1,0 NI/min . Nota-se que com o decréscimo da pressão no interior da câmara do aparato experimental, a taxa de retirada de CO_2 do líquido aumenta.

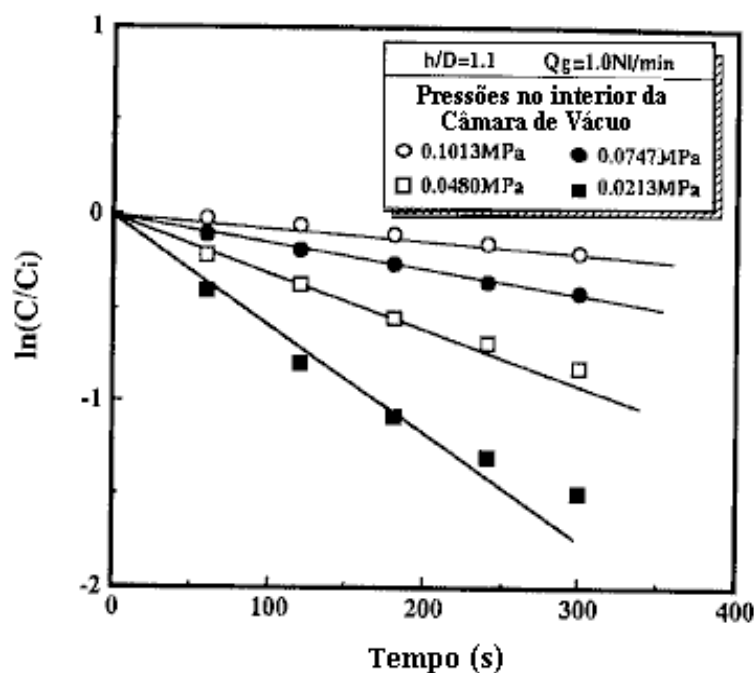


Figura 3.19 – Relação entre $\ln(C/C_i)$ e o tempo sob várias pressões no interior do vaso, sendo C_i a concentração inicial de CO_2 dissolvido na água deionizada (Sakaguchi e Ito, 1995).

Kishimoto et al (1993), utilizando um forno de indução com 20 kg de aço líquido, estudaram a cinética de descarburização no ferro líquido, para ultrabaixos teores de carbono. Para teores de carbono na faixa de 300 a 500 ppm, não foi observado efeito da concentração de oxigênio sobre a taxa de descarburização. Quando a relação $\%C/\%O$ no metal é superior a 1,93, a descarburização é controlada pela transferência de massa no carbono. Os autores avaliaram também o efeito do vácuo sobre a cinética de descarburização. A figura 3.20 mostra esse efeito. A constante cinética de descarburização pode ser expressa pela equação 3.24.

$$K = \frac{\ln \left[\frac{[C]_i - [C]_e}{[C]_{i+1} - [C]_e} \right]}{(t_{i+1} - t_i)} \quad (3.24)$$

onde:

K = constante da taxa de descarburização aparente (min^{-1});

$[C]_e$ = concentração de carbono em equilíbrio com a pressão parcial de CO gasoso (ppm);

$[C]_i$ = concentração de carbono no ponto i (ppm);

t = tempo (s).

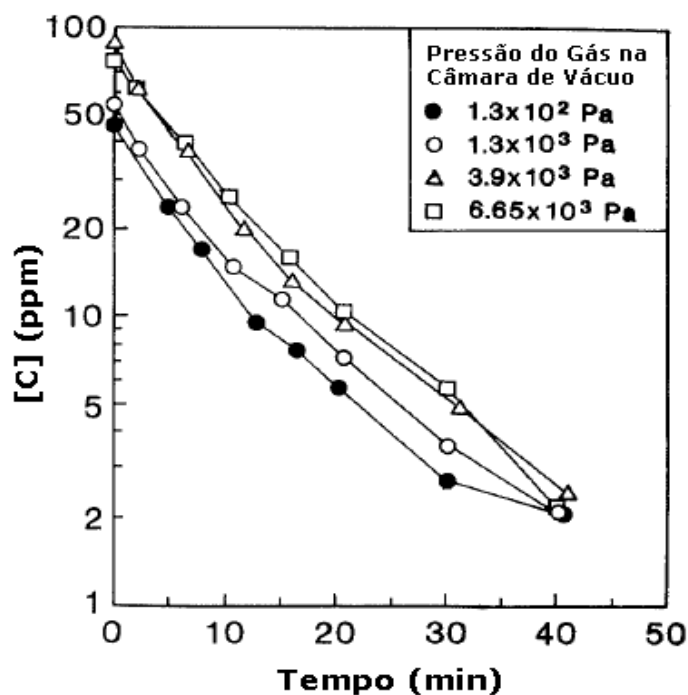


Figura 3.20 – Influência da pressão na câmara de vácuo em relação à variação do teor de carbono com o tempo, segundo Kishimoto et al (1993).

Kishimoto et al (1993) consideraram que a descarburização ocorre apenas na superfície do aço líquido na câmara de vácuo. A figura 3.21 mostra a relação entre o teor de carbono e o coeficiente volumétrico de transferência de massa de carbono na interface metal/gás por unidade de área da seção transversal do vaso, ak/S , no experimento do forno de indução de 20kg e no RH nº3 de Chiba Works de 260 toneladas. Nesta figura nota-se a forte dependência do coeficiente volumétrico de transferência de massa com o teor de carbono para a descarburização no desgaseificador RH. Esta dependência foi observada em vários reatores RH. O valor de ak/S no RH na faixa de ultrabaixo teores de carbono é

de 10 – 100 vezes maior que os valores medidos no forno de indução. Considerando este fato e o fato de que os valores de ak/S nos experimentos em laboratório se aproximam quando o teor de carbono é inferior a 10 ppm, a dependência de ak com o teor de carbono no degaseificador RH foi explicado pelo decréscimo do volume da zona de nucleação das bolhas de CO.

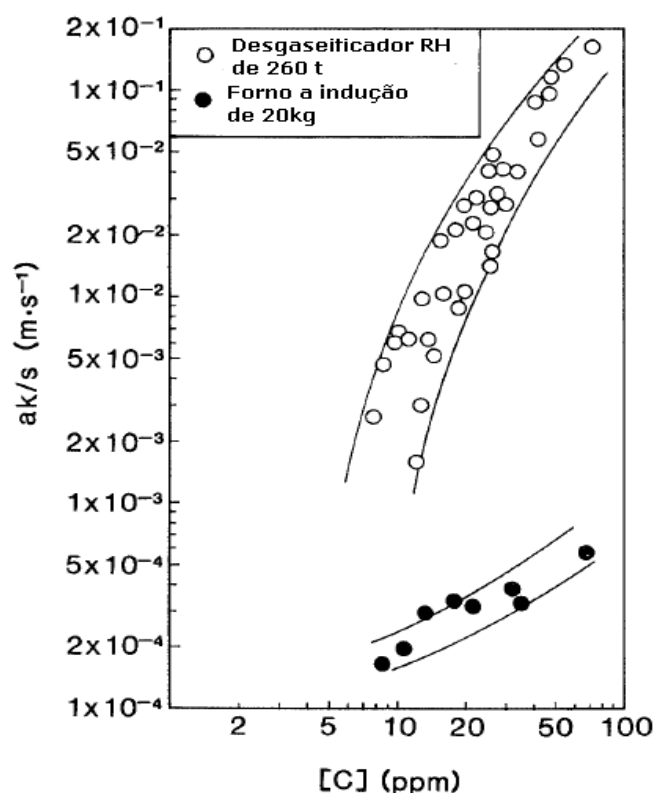


Figura 3.21 – Relação entre o teor de carbono e o coeficiente volumétrico de transferência de massa de carbono na interface metal/gás por unidade de área da seção transversal do vaso, ak/S (Kishimoto et al, 1993).

A taxa de circulação também influencia o valor de ak_C pelo aumento das projeções de metal líquido no interior da câmara de vácuo ("splash"). O aumento de ak_C/S com a elevação da taxa de circulação é também explicado. A pequena correlação entre ak_C e a área transversal do vaso no degaseificador RH, S , sugere que a área de reação é grandemente afetada pela quantidade de "splashes" do metal. A maior dependência de ak_C com o teor de carbono no RH industrial pode ser interpretada como uma consequência da maior quantidade de "splashes" do metal e pela significativa mudança da taxa de evolução de CO gasoso, conforme observado por Kuwabara et al (1988).

Kuwabara et al (1988) interpretaram o decréscimo de ak_C no campo de teores ultrabaixos de carbono no RH como sendo causado pela redução do volume da zona de nucleação das bolhas de CO e pela existência de uma pressão crítica de evolução de bolha de CO. Os autores observaram que a altura dos “splashes” do metal no campo do carbono acima de 50 ppm é muito grande, e diminui com a redução da concentração de carbono. Há um aumento significativo da área na interface metal/gás no aço nos “splashes”, e, conseqüentemente um aumento em ak_C . Além disso, a área de reação para a descarburização no metal projetado (“splashes”) é muito maior em comparação com a não projeção de aço líquido na câmara de vácuo. A área interfacial total do gás/aço no processo RH é composta pelas áreas:

- das bolhas dos gases/ interfaces aço líquido;
- da superfície livre do aço exposto ao vácuo;
- dos refratários/ interfaces aço líquido;
- das pequenas gotas de aço que projetam.

Inoue et al (1992) realizaram experimentos com objetivo de aumentar a taxa de descarburização até o campo de baixos teores de carbono. Os autores observaram que o aumento da área interfacial era mais eficiente que o aumento no coeficiente de transferência de massa global. Um dos métodos práticos para aumentar a área interfacial foi a injeção de argônio no aço líquido. Essa injeção de argônio dentro do vaso a vácuo do RH foi investigada no modelo físico utilizando injeção de ar, sendo que a taxa de dessorção de CO_2 foi usada para simular a taxa de descarburização. A injeção de gás nos bicos foi feita na parte mais baixa da parede lateral na câmara de vácuo com 1, 8 e 16 bicos (figura 3.22). De acordo com os autores, o aumento no número de bicos foi efetivo considerando uma vazão de gás constante. Pelas análises realizadas, a taxa de dessorção de CO_2 foi aumentada pela injeção dentro da câmara de vácuo. Finalmente, ensaios em planta foram feitos na NKK Corporation, no RH 2 em Fukuyama Works. As configurações dos bicos foram as mesmas como no caso dos 8 bicos no modelo a água. A vazão de gás na perna de subida foi de 2500 NI/min e a vazão de gás no interior da câmara de vácuo foi de 800 NI/ min. Com essa prática foi possível diminuir o teor de carbono de 200 para 10 ppm em 10 min.

Os autores propuseram a seguinte reação para a previsão da variação do teor de carbono no aço com o tempo:

$$[C]_t = [C]_0 \cdot \exp\left[-k\left(\frac{A}{V}\right) \cdot t\right] \quad (3.25)$$

onde:

k = coeficiente global de transferência de massa ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$);

A = área interfacial (cm^2);

$[C]_t$ = teor de carbono no aço líquido (% massa);

$[C]_0$ = teor de carbono inicial no aço líquido (% massa);

V = volume de aço líquido na panela (cm^3);

t = tempo(s).

Foi constatado que k depende dos seguintes parâmetros:

- (1) transferência de massa de carbono no aço líquido;
- (2) reação química (efeito do oxigênio e enxofre na descarburização);
- (3) transferência de massa na interface metal/ gás, onde há a geração de CO.

O aumento no número de bicos na perna de subida, para uma vazão constante de gás, aumentou taxa de descarburização. Isto significa que houve uma maior dispersão das bolhas dentro da ampla área da câmara de vácuo. Foi observado também que a injeção de argônio no interior da câmara de vácuo teve influência na taxa de circulação e na quantidade de cascão no seu interior.

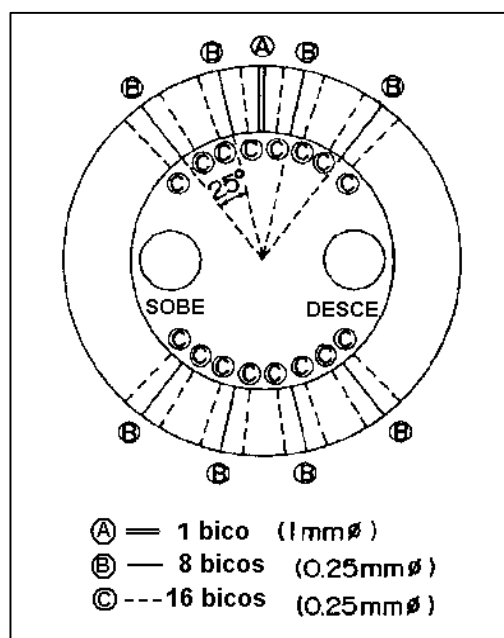


Figura 3.22 – Dispersão dos bicos com configurações de 1, 8 e 16 furos no interior da câmara de vácuo (Inoue, 1992).

Yamaguchi et al (1992) propuseram um novo modelo cinético para a reação de descarburização no RH. O modelo foi desenvolvido buscando esclarecer o efeito da concentração de oxigênio na taxa de descarburização, com base no mecanismo de controle misto, envolvendo a transferência de massa no carbono e oxigênio no aço líquido na câmara de vácuo e o transporte de carbono e oxigênio pelo fluxo de circulação. O modelo também considera a transição entre as regiões de controle por difusão de carbono e controle por difusão do oxigênio na descarburização no RH. A transição varia com o valor do coeficiente volumétrico de transferência de massa do carbono, ak_C , para a taxa de circulação, Q .

A equação (3.26) relaciona a constante cinética com a taxa de circulação e o coeficiente volumétrico de transferência de massa.

$$K_C = \frac{1}{W \left(\frac{1}{Q} + \frac{1}{ak_C \cdot \rho} \right)} \quad (3.26)$$

onde:

W = massa de aço na panela (kg);

Q = taxa de circulação (kg/s);

ak_C = coeficiente volumétrico de transferência de massa;

ρ = densidade do aço líquido (kg/m³);

K_C = constante cinética de descarburização (s⁻¹).

Segundo este modelo, pode se considerar que em baixas concentrações de carbono, a taxa de descarburização é controlada pela transferência de massa de carbono, e que uma equação de primeira ordem pode descrever a cinética de descarburização.

O coeficiente volumétrico de transferência de massa de carbono no RH, ak_C , foi determinado. Seu valor depende da concentração de carbono e da taxa de circulação, Q . Uma análise de regressão permitiu a obtenção da seguinte relação (Yamaguchi et al, 1992):

$$ak_C \propto A^{0,32} \cdot Q^{1,17} \cdot C_V^{1,48} \quad (3.27)$$

onde:

A = área da seção reta da câmara de vácuo (m²);

C_V = concentração de carbono na câmara de vácuo (%).

Resultados obtidos com o modelo de reação foram comparados com os resultados obtidos do RH n°3 de Chiba Works, e de acordo com os autores houve uma discrepância entre a taxa de descarburização calculada e os resultados obtidos nas concentrações mais baixas de oxigênio, onde a transferência de massa do oxigênio é a etapa que determina a taxa de reação. Isto indica que há algum suprimento extra de oxigênio dentro da câmara de vácuo em adição ao oxigênio suprido em grande parte pelo metal na panela através do fluxo de circulação. Segundo os autores, este suprimento extra poderia vir da escória arrastada para dentro da câmara de vácuo e/ou uma entrada de ar atmosférico.

Kitamura et al (1996) desenvolveram um modelo matemático para dessorção de nitrogênio e reação de descarburização no desgaseificador a vácuo. A etapa controladora considerada foi a transferência de massa do nitrogênio, carbono e oxigênio no aço líquido e as reações químicas consideradas expressas por:

$$\underline{N} + \underline{N} = N_{2(g)} \quad (3.28)$$

$$\underline{C} + \underline{O} = CO_{(g)} \quad (3.29)$$

Os autores consideraram várias regiões de reação: a superfície do banho, as interfaces com o argônio gasoso injetado e do CO (monóxido de carbono) gasoso formado dentro do banho. Essas regiões são mostradas na figura 3.23. Como indicado pelos autores, a reação de dessorção do nitrogênio ocorre nas bolhas de CO formadas dentro do aço (51%), na superfície do banho (36%) e nas bolhas de argônio gasoso injetado (13%). Isto ocorre porque a área de reação da bolha de CO é maior que a das outras regiões e a pressão parcial do nitrogênio na bolha de CO é baixa. A reação de descarburização ocorre mais acentuadamente na superfície do banho (90%), na bolha de CO (8%) e na bolha de argônio gasoso injetado (2%).

Takahashi et al (1995) desenvolveram um modelo para calcular a taxa de descarburização separadamente para as bolhas de CO, bolhas de argônio e superfície livre. De acordo com os autores, a injeção de argônio na perna de subida é o principal fator para que ocorra a descarburização do aço, sendo considerada a controladora da mistura através da transferência de massa na fase líquida, reação química na interface da bolha e a transferência de massa do CO. O modelo foi desenvolvido com base no controle misto através da transferência de massa na fase líquida e na reação química. Além disso, a diferença na concentração do carbono entre o aço líquido na panela e na câmara de vácuo foi estudada. Como resultado destas comparações, encontrou-se que a contribuição da descarburização nas bolhas de CO é significativa em relação à total. Foram

consideradas na simulação as bolhas de argônio, bolhas de CO e superfície livre. A área superficial na câmara de vácuo é bem maior que a seção transversal, isso devido às projeções, ondas e bolhas. Diferentemente de outros autores, Takahashi et al (1995) mostraram que a taxa de descarburização pela superfície livre é menos pronunciada em comparação com as bolhas. A figura 3.24 mostra que o teor de carbono na panela não diminui tanto quando a área da superfície livre é aumentada 10, 100 e 1000 vezes em relação à seção transversal da câmara de vácuo. De acordo com os autores, o resultado de 1000 vezes, próximo aos dados operacionais, comprova que a descarburização que ocorre na superfície livre é menor que a descarburização que ocorre na superfície das bolhas.

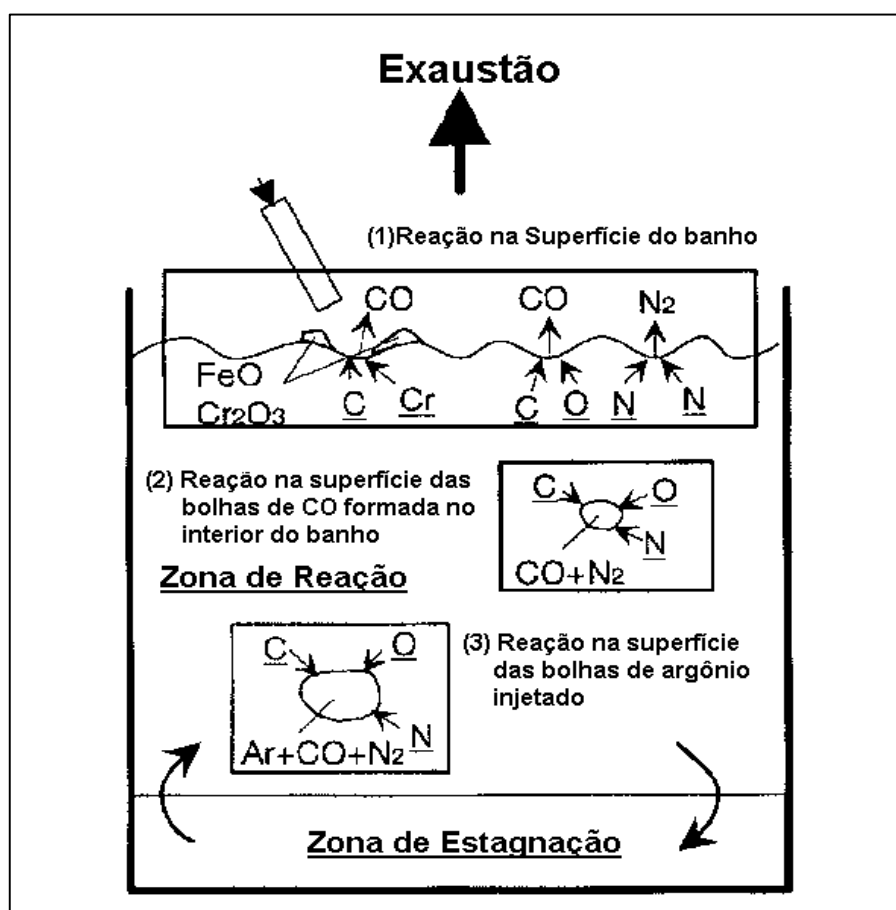


Figura 3.23 – Regiões onde ocorrem as reações de descarburização e desgaseificação (Kitamura et al, 1996).

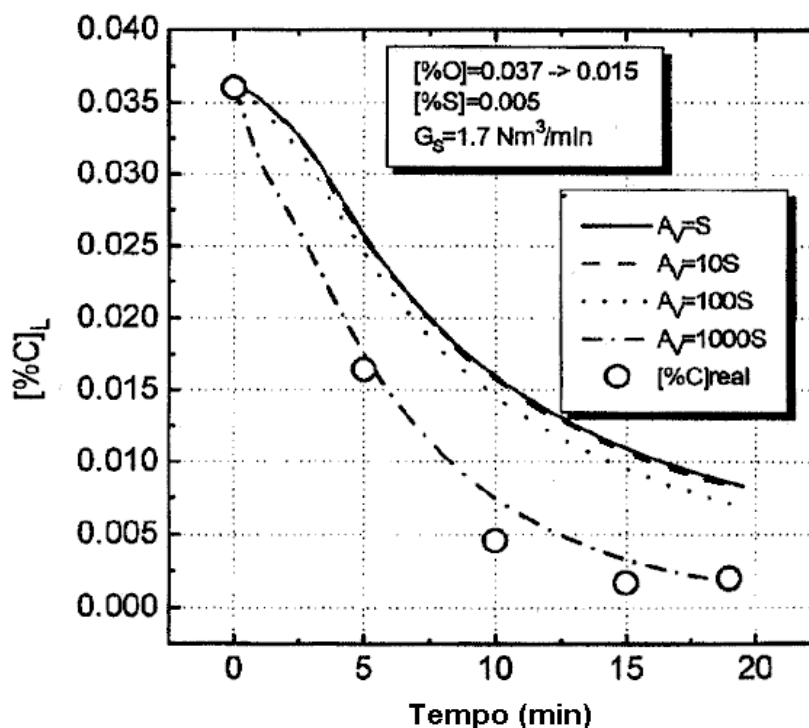


Figura 3.24 – Influência da área da superfície livre sobre a descarbonização, sendo $[\%C]_L$ a concentração de carbono na panela, G_s a vazão de argônio gasoso injetado (Takahashi et al, 1995).

Yamana et al (1992) propuseram a aceleração da descarbonização através da introdução de sopro de oxigênio por lança refrigerada na superfície do metal líquido na câmara de vácuo. Foi observado que, com essa prática, a taxa de descarbonização foi aumentada quando o teor de carbono estava por volta de 200 ppm, mas diminuiu quando o teor de carbono estava abaixo de 100 ppm. Isso é observado na figura 3.25. Segundo os autores, a razão da diferença é que a força motriz para a reação de descarbonização é aumentada na região de alto teor de carbono.

Com o sopro de oxigênio na câmara de vácuo, foi possível a redução do tempo de corrida na rota BOF – RH.

Os autores acima também propuseram um novo método para estimar o teor de carbono no aço através da análise dos gases de exaustão. A equação obtida é expressa por:

$$\frac{[d\%C]}{dt} = -2,23 \times 10^{-6} \frac{F_{WG}}{K_C} [(CO) + (CO_2)] \quad (3.30)$$

onde:

K_C = constante aparente taxa de descarburização (s^{-1});

F_{WG} = vazão dos gases de exaustão (Nm^3/s);

(CO), (CO₂) = concentrações de CO e CO₂ no gás de exaustão (% em volume).

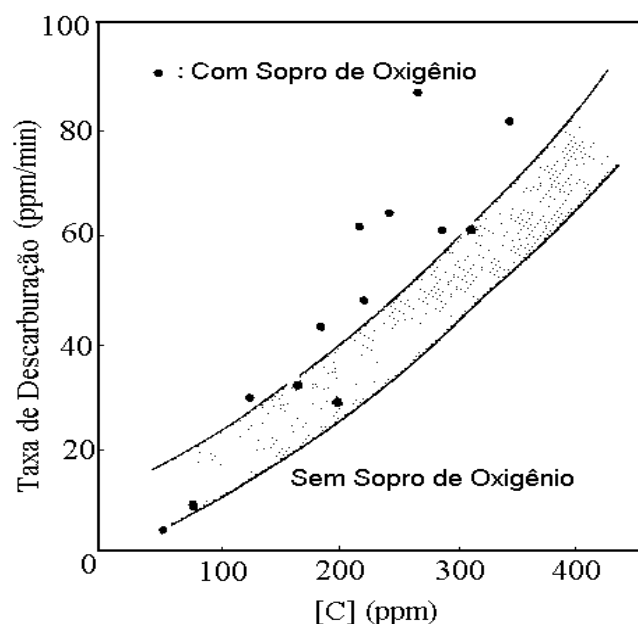


Figura 3.25 – Efeito do sopro de oxigênio na taxa de descarburização (Yamana et al, 1992).

Tembergen et al (2007) consideraram que o aço líquido no equipamento de refino a vácuo está dividido em dois vasos, um vaso de reação, onde a descarburização ocorre (câmara de vácuo), e um vaso de mistura (panela do desgaseificador RH). O aço líquido circula com velocidade constante entre estes dois vasos. Depois de algumas considerações relativas ao balanço de massa do carbono no vaso de mistura e no vaso de reação, em que a concentração inicial de carbono é constante, foram obtidas as seguintes equações para expressar a variação do teor de carbono com o tempo:

$$(C_1 - C_e) = (C_1^0 - C_e) \cdot \exp[-K \cdot t] \quad (3.31)$$

$$K = \frac{Q'}{V_M} \cdot \frac{ak}{Q' + ak} = \beta \cdot \rho \cdot A \quad (3.32)$$

onde:

C_1 = concentração de carbono na panela (%);

C_e = concentração de carbono o aço líquido em equilíbrio com a fase gasosa (%);

C_1^0 = concentração inicial de carbono na panela (%);

K = constante cinética da reação (min^{-1});

t = tempo (s);

Q' = taxa de circulação (t/min);

V_M = volume do aço no vaso de mistura (m^3);

ak = coeficiente volumétrico para a descarburização (min^{-1});

β = coeficiente de transferência de massa do carbono no aço líquido (m/kg.s);

ρ = densidade do aço líquido (kg/m^3);

A = área interfacial do metal exposto ao vácuo (m^2).

Os efeitos da taxa de circulação e do coeficiente volumétrico de descarburização na constante cinética de reação de descarburização foram calculados e são mostrados na figura 3.26. O diagrama identifica as três regiões:

- região (A): k aumenta ligeiramente com o aumento da taxa de recirculação (controle de circulação);
- região (B): k aumenta ligeiramente com o aumento do coeficiente volumétrico de descarburização ak (controle de reação);
- região (C): k afetado igualmente pela velocidade da circulação Q' e o coeficiente volumétrico ak (controle misto).

A figura 3.26 pode ser usada para investigar condições que favoreçam a obtenção de maiores taxas de descarburização. Se a taxa de circulação é pequena, a constante aparente, k , é controlada pela circulação e pode ser melhorada pelo aumento da taxa de circulação. Isso pode ser conseguido com o aumento do diâmetro das pernas, ou com o aumento da vazão do gás injetado. Neste caso o coeficiente volumétrico de descarburização é suficientemente alto.

Neste diagrama, as regiões (I), (II) e (III) representam 3 fases da investigação desenvolvida em um RH de 270 t com o objetivo de aumentar a taxa de descarburização. No início da investigação, as condições estavam na região (I). Como o tamanho das pernas foram expandidas para aumentar a taxa de recirculação, as condições foram melhoradas para a região (II). Finalmente, com o aumento de ak pela agitação do aço líquido no vaso com mais vigor, houve um aumento da taxa de reação interfacial entre o gás e o aço líquido, assim as condições foram melhoradas para a região (III). Considerando o estado da arte do equipamento RH, os “splashes” causam as altas taxas de descarburização, que correspondem a altos valores de k .

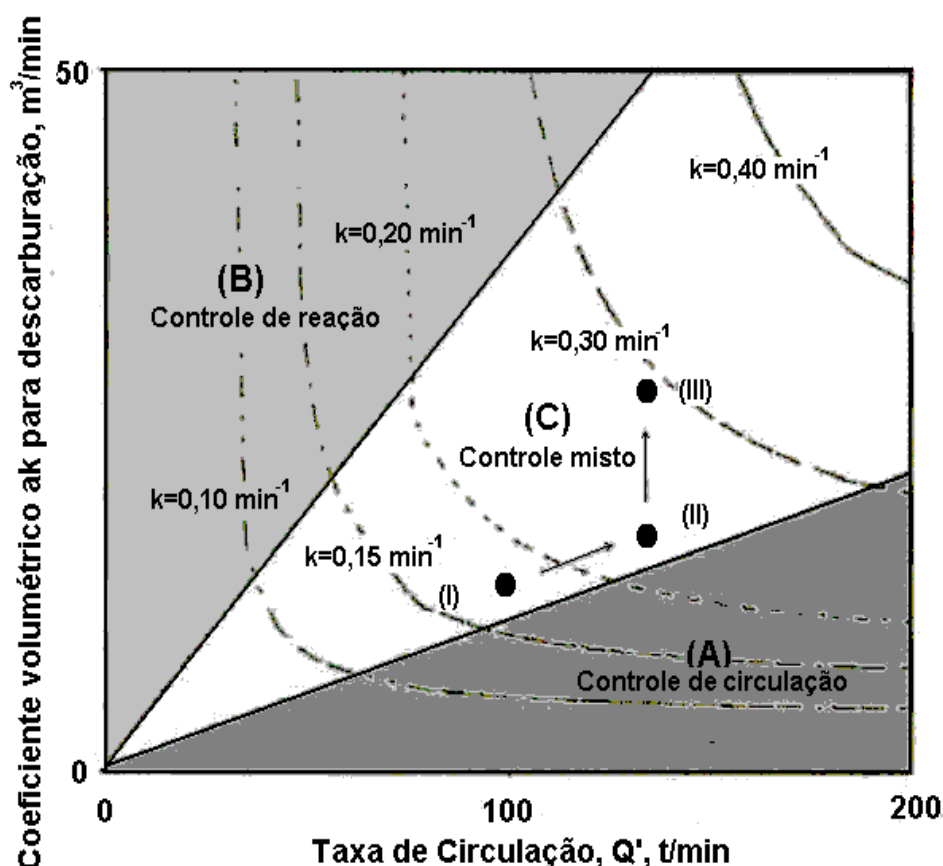


Figura 3.26 – Coeficiente volumétrico de transferência de massa da descarburização pela taxa de circulação e taxa constante (Tembergen et al, 2007)

Em um trabalho recente, Tembergen et al (2007) utilizou um novo desgaseificador chamado de RH – TOP. Neste processo, lanças são usadas para injetar pós sobre o aço líquido para a redução de teores de enxofre e carbono a níveis cada vez mais baixos. As remoções de hidrogênio e nitrogênio no RH-TOP seguem equações similares. Em geral, a taxa de remoção do hidrogênio é maior do que a do carbono, isso devido o coeficiente de transferência de massa do hidrogênio ser mais alto por um fator de três se comparado com o do carbono.

Estudos foram realizados por Ehara et al (1997) sobre o método KTB. Este método permite o suprimento de oxigênio gasoso na câmara de vácuo por uma lança refrigerada a água. Apesar da tecnologia KTB ter sido originalmente desenvolvida pela Kawasaki Steel, ela ganhou uma excelente reputação não apenas pelo aumento na taxa de descarburização, mas também pela melhora operacional e performance de custo da aciaria como um todo. Usuários também utilizam o método KTB para um amplo campo de

aplicações e outros propósitos além da descarburagem do aço ultrabaixo carbono, incluindo refino de aços alta liga, dessulfuração na câmara de vácuo e controle de temperatura. Apesar dos autores não terem comentado, as condições termodinâmicas em um ambiente oxidante não são muito favoráveis à dessulfuração. Deste modo, para que ocorra a dessulfuração é necessária a adição de um agente dessulfurante.

Endoh et al (1990) desenvolveram um processo multifuncional de refino secundário, designado processo de injeção RH, através da combinação do processo de degaseificação a vácuo RH com o processo de injeção de pó na panela, denominado processo de injeção RH. Este processo, conforme resultados obtidos na indústria Oita Works no Japão, pode simultaneamente remover enxofre e hidrogênio do aço líquido e pode produzir aços para aplicações como: estruturas externas e tubos resistentes a fissuras, que, de outra forma, requerem processos de refino secundário convencional. Segundo os autores, este processo, quando comparado ao processo RH original, permite aumentar a taxa e eficiência da retirada de hidrogênio, descarburagem e remoção de inclusões não-metálicas. O processo de injeção RH emprega injeção de argônio gasoso e de pós reagentes por uma lança em uma posição mais profunda, abaixo da perna de subida do degaseificador a vácuo RH. Este processo se caracteriza por:

- diminuição da agitação da escória da panela;
- maior permanência do pó reagente em todo aço líquido;
- maior homogeneização do pó no interior do aço líquido.

O processo de injeção RH minimiza o efeito adverso da escória da panela na reação do aço líquido com pó reagentes e aumenta a taxa de recirculação. A figura 3.27 compara o processo de injeção RH com o processo convencional na mudança do teor de carbono, quando o aço líquido é descarburado sob condições de alto vácuo (2 Torr). A figura mostra que, quando a vazão de argônio é de 2000 NI/min pela lança, o tempo para alcançar um teor de carbono de cerca de 30 ppm é de 8 min.

De acordo com Ahrenhold et al (2003), o processo de descarburagem pode ser acelerado através da injeção de agentes contendo $\text{Fe}_2\text{O}_{3(s)}$ por uma lança dentro do aço. Na reação de descarburagem, as partículas de minério de ferro atuam como um sítio para nucleação de bolhas de CO e como uma fonte de suprimento de oxigênio. Desde que a reação ocorra dentro do aço e não entre a escoria e o aço, a taxa de injeção pode ser a mais alta possível (100kg/min), para maximizar a profundidade de penetração.

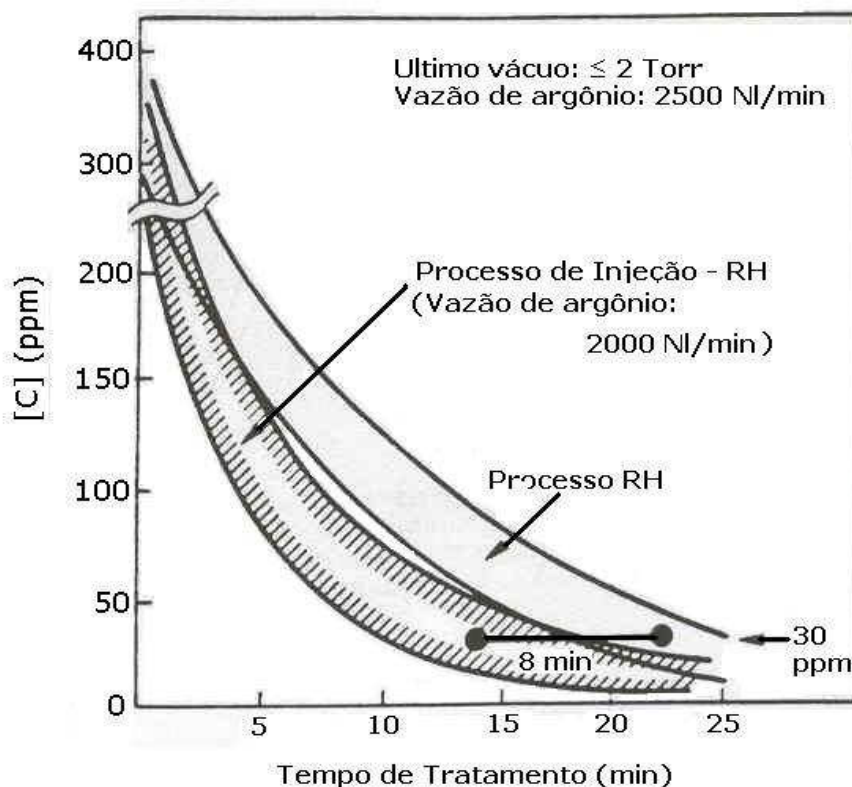


Figura 3.27 – Efeito do processo de injeção RH com o processo convencional na reação de descarbonização sob condições de alto vácuo (2 Torr), segundo Endoh et al (1990).

Kato et al (1993) desenvolveram estudos teóricos e experimentais para entender quantitativamente o efeito do escoamento do fluido na taxa da reação de descarbonização no desgaseificador RH. Os cálculos hidrodinâmicos do escoamento do fluido na panela foram validados através de experimentos em um modelo físico. O modelo de descarbonização possibilita a previsão da distribuição de concentração de carbono na panela durante um tratamento no RH. O máximo teor de carbono, que foi encontrado na zona de recirculação na panela, é duas vezes maior que o mínimo valor obtido na região abaixo da perna de descida. A figura 3.28 mostra o efeito da taxa de circulação na mudança do teor de carbono com o tempo na panela e na câmara de vácuo.

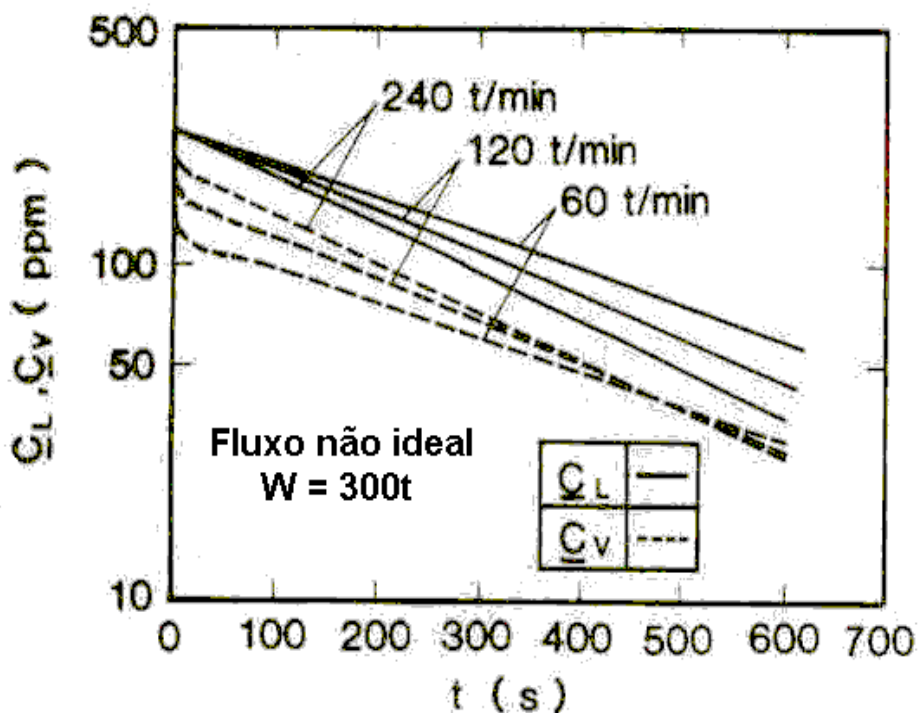


Figura 3.28 – Influência da taxa de circulação na mudança do teor de carbono com o tempo na panela e na câmara de vácuo, sendo C_L a concentração de carbono dissolvido na panela e C_V a concentração de carbono dissolvido na câmara de vácuo (Kato et al, 1993).

Park et al (2003) desenvolveram um novo modelo de descarburação para o processo RH, com o objetivo de calcular a taxa de reação de descarburação. Foi usado um software de fluidodinâmica computacional. O comportamento do argônio gasoso injetado e de escoamento do aço no processo RH foram considerados. De acordo com os autores, com base no modelo desenvolvido, a taxa de reação de descarburação pode ser calculada pelo estabelecimento de um modelo de reação de descarburação. Cálculos de concentração de carbono e oxigênio pelo modelo desenvolvido foram comparados com resultados medidos em um desgaseificador RH com capacidade de 270 toneladas e são mostrados na figura 3.29. A concentração de carbono decresce com o tempo e está de acordo com os resultados experimentais.

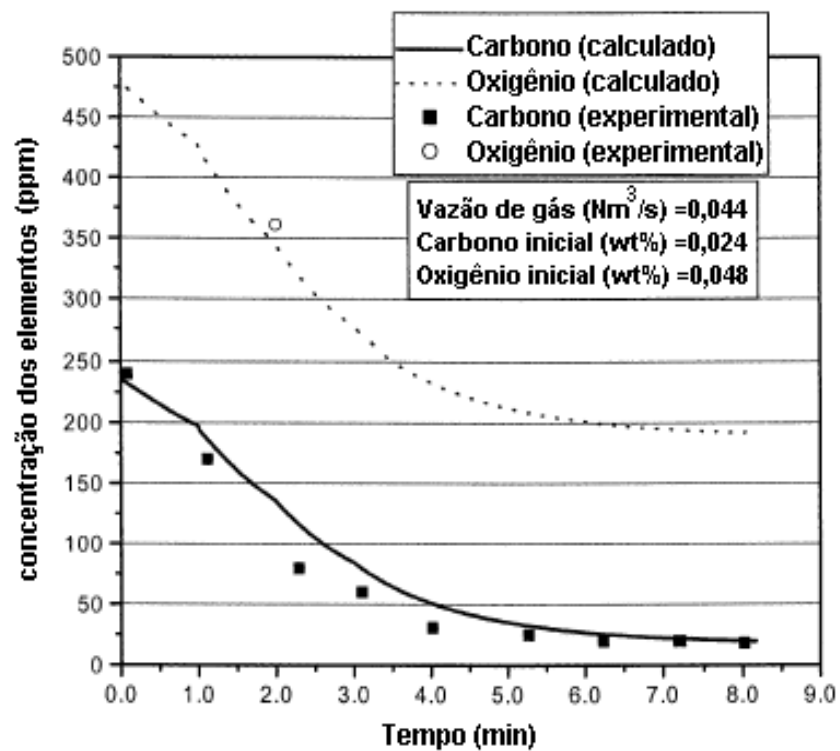


Figura 3.29 – Comparação entre os cálculos de concentração de carbono e oxigênio pelo modelo desenvolvido com resultados medidos em um desgaseificador RH (Park et al, 2003).

4. METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado em um modelo físico do desgaseificador RH. Variações em sua configuração foram introduzidas para avaliar os seus efeitos nas taxas de circulação e de descarburização. Neste item serão apresentados os parâmetros adotados nos ensaios no modelo físico, as variáveis utilizadas nos experimentos e uma descrição detalhada de todo aparato experimental. Também serão apresentados os procedimentos para realização dos ensaios para avaliação da taxa de circulação e da taxa de descarburização, bem como os cálculos para a obtenção da taxa de circulação. Mas antes, será apresentado o dimensionamento do modelo físico, o qual determina as variáveis e os parâmetros a serem utilizados.

4.1. Aparato Experimental

Para estudar o escoamento do aço líquido no processo RH, foi construído um modelo físico em acrílico, onde foram realizados experimentos para a determinação das taxas de circulação e de descarburização em função do tempo, analisando o efeito das seguintes variáveis:

- Vazão de gás injetado na câmara de vácuo;
- Vazão de gás injetado nas pernas de subida;
- Diâmetro dos bicos de injeção de gás.

A figura 4.1 mostra uma vista frontal do modelo físico do processo RH usado nos ensaios nas instalações do Laboratório de Simulação de Processos (LaSiP).

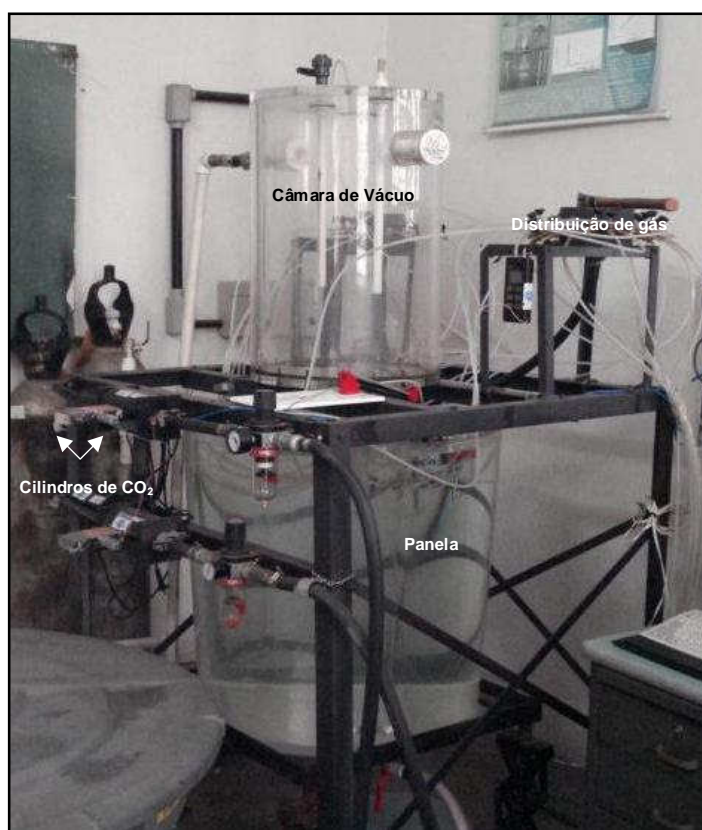


Figura 4.1 – Vista do Modelo Físico Reator RH – (LaSiP/ UFMG)

4.1.1. Dimensionamento do modelo físico

O modelo físico foi construído nas dependências do Laboratório de Simulação de Processos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais.

Foi feita uma escolha arbitrária da semelhança geométrica entre os sistemas (industrial e modelo), de forma que a razão de suas grandezas geométricas fosse constante. Para tal, foi definido um fator de escala de 1:5 com o desgaseificador RH da USIMINAS.

As similaridades dinâmica e cinemática são estabelecidas em função dos seguintes números adimensionais:

- Froude (Fr), que considera a razão entre a força de inércia e a força da gravidade do líquido, atuantes no equipamento industrial e no modelo físico;
- Reynolds (Re), que considera a força de inércia e a força de natureza viscosa;

- Froude modificado (Fr_m), que considera a razão entre a força de inércia do gás nos bicos de injeção e a força de gravidade do líquido, sendo determinante no grau de penetração do jato gasoso.

Utilizando a similaridade desses grupos adimensionais do modelo físico com o equipamento industrial, pode-se encontrar a relação da vazão de gás injetado e dos diâmetros dos bicos de injeção.

Para a similaridade cinemática, considera-se o número de Froude do equipamento industrial igual ao número de Froude do modelo físico.

O parâmetro (Q/D^2V) , refere-se à vazão de gás e de aço, considerando a fração de volume da perna de subida que é ocupada pelo gás injetado. Este parâmetro pode ser utilizado para encontrar as relações entre a vazão de gás injetado do modelo físico, Q_M , em relação a vazão de gás injetado no equipamento industrial, Q_I (corrigida a partir de um fator de expansão do argônio), chega-se a:

$$Q_M = 0,2453.Q_I \quad (4.1)$$

Pode-se determinar a relação de diâmetro entre os bicos de injeção de gás do modelo físico, ϕ_M , e do equipamento industrial, ϕ_I , igualando o número de Froude modificado do equipamento industrial com o número de Froude modificado do modelo físico. A seguinte expressão é obtida:

$$\phi_M = 0,4539.\phi_I \quad (4.2)$$

Os cálculos utilizados para determinar esses valores estão apresentados detalhadamente no Apêndice I deste trabalho.

Os diâmetros dos bicos utilizados nos ensaios de taxa de circulação e taxa de descarburização foram utilizados baseados nas condições de melhoras do funcionamento do equipamento, não fazendo uma referência direta aos bicos utilizados pela indústria, mas utilizando possíveis diâmetros de bicos que determinam a tendência desta melhora.

4.1.2. Características do modelo físico

As características do modelo físico e do sistema de injeção de gás são apresentadas na tabela IV.1, e representados na figura 4.2.

Tabela IV.1 - Características do modelo físico e do sistema de injeção de gás

Parâmetros	Símbolos	Valores
Panela		
- diâmetro maior (m)	D	0,720
- diâmetro menor (m)	d	0,648
- altura (m)	H	0,760
- nível do líquido (m)	h_l	0,680
Câmara de Vácuo		
- diâmetro (m)	D_{cv}	0,420
- altura (m)	h	0,712
- nível do líquido (m)	n	0,095
- pressão relativa (mbar)	P	28,5
Pernas		
- comprimento (m)	L	0,312
- diâmetro (m)	d_s	0,127
- profundidade de imersão (m)	p	0,135
- distância entre os centros (m)	c	0,269
Injeção de gás:		
- vazão de gás total (l/ min)		500
- bicos na perna de subida:		
- vazão de gás (l/ min)		50 - 450
- número		10
- diâmetro (mm)		1,0;1,5;2,2;2,8
- posição abaixo do nível do líquido, l (m)	l	0,075
- bicos na câmara de vácuo:		
- vazão de gás (l/ min)		50 - 450
- número		12
- diâmetro (mm)		1,0;1,5;2,2;2,8

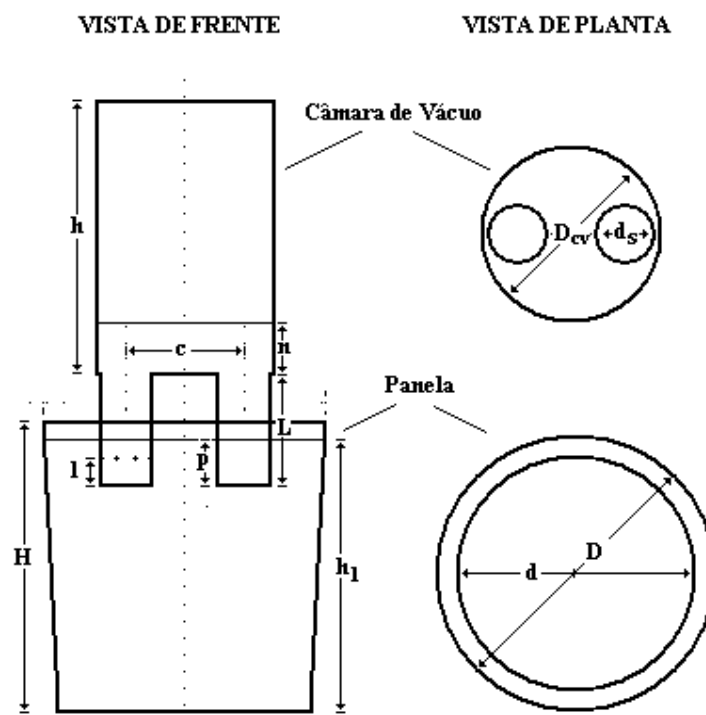


Figura 4.2 – Representação esquemática dos parâmetros do modelo físico utilizado para os experimentos.

Para o estudo da injeção de gás na câmara de vácuo, foram utilizados 12 bicos acoplados na base da câmara de vácuo, dispostos simetricamente no perímetro da perna de subida, como mostrado na figuras 4.3.a e 4.3.b.

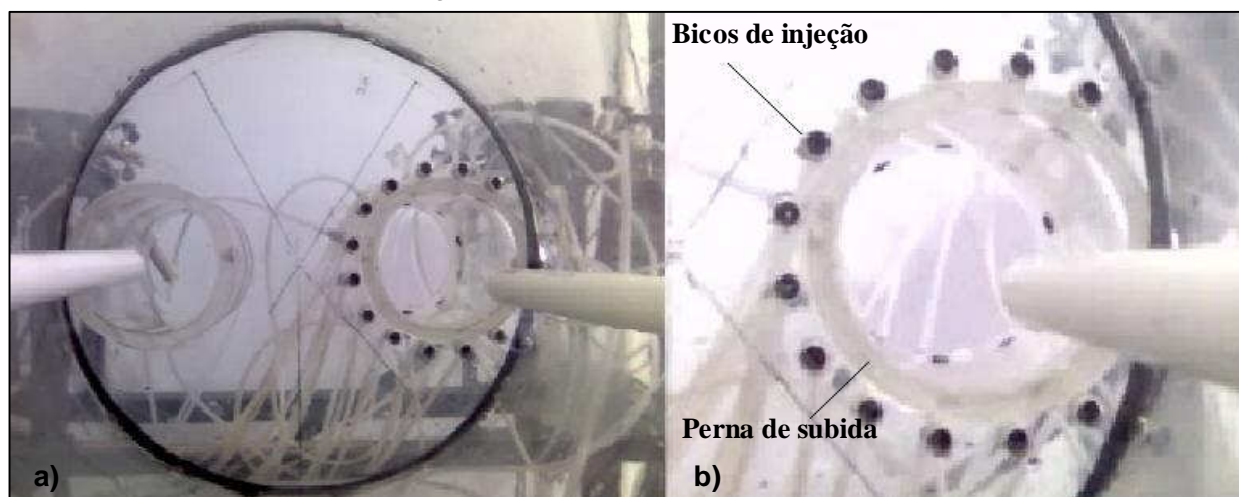


Figura 4.3 – Detalhes da distribuição dos bicos no interior da câmara de vácuo, onde em a) pode se observar a vista de planta da base da câmara de vácuo, e em b) o detalhe dos bicos no perímetro da perna de subida na base da câmara de vácuo.

4.2. Experimentos

Dois tipos de experimentos foram realizados no presente trabalho:

- ensaios para a avaliação da taxa de circulação;
- ensaios para a avaliação da taxa de descarburização.

Estes ensaios são descritos a seguir.

4.2.1. Taxa de circulação

A obtenção da taxa de circulação foi feita através da injeção de solução salina na perna de subida e medida de variação da concentração do sal (condutividade elétrica) na perna de descida por um medidor de tensão. O sensor é conectado a uma placa de aquisição de dados, que por sua vez faz interface com o programa de computador, onde os dados de cada ensaio são armazenados e processados. A figura 4.4 mostra uma vista esquemática do aparato experimental.

O sensor é constituído de duas placas de platina energizadas através de uma fonte de tensão. Durante o ensaio, é adicionada uma quantidade de traçador responsável pela alteração da condutividade da água, fazendo com que o sensor detecte essa variação através da tensão entre as placas metálicas. Através de uma curva de calibração, previamente determinada, é possível converter o sinal de tensão em concentração de sal.

A obtenção da taxa de circulação consiste no desenvolvimento dos seguintes procedimentos:

- 1- Enchimento da panela RH com água até o nível pré-determinado para fazer os testes;
- 2- Circulação de fluido na câmara de vácuo e na panela pela bomba a vácuo e pela injeção de ar nas pernas de subida;
- 3- Injeção do traçador na perna de subida, que é feita pela adição de 10g de KCl dissolvido em 30 ml de água quente;
- 4- Obtenção da curva da variação da concentração de traçador, medida na perna descida do RH, em função do tempo;
- 5- Processamento dos dados para a obtenção da taxa de circulação.

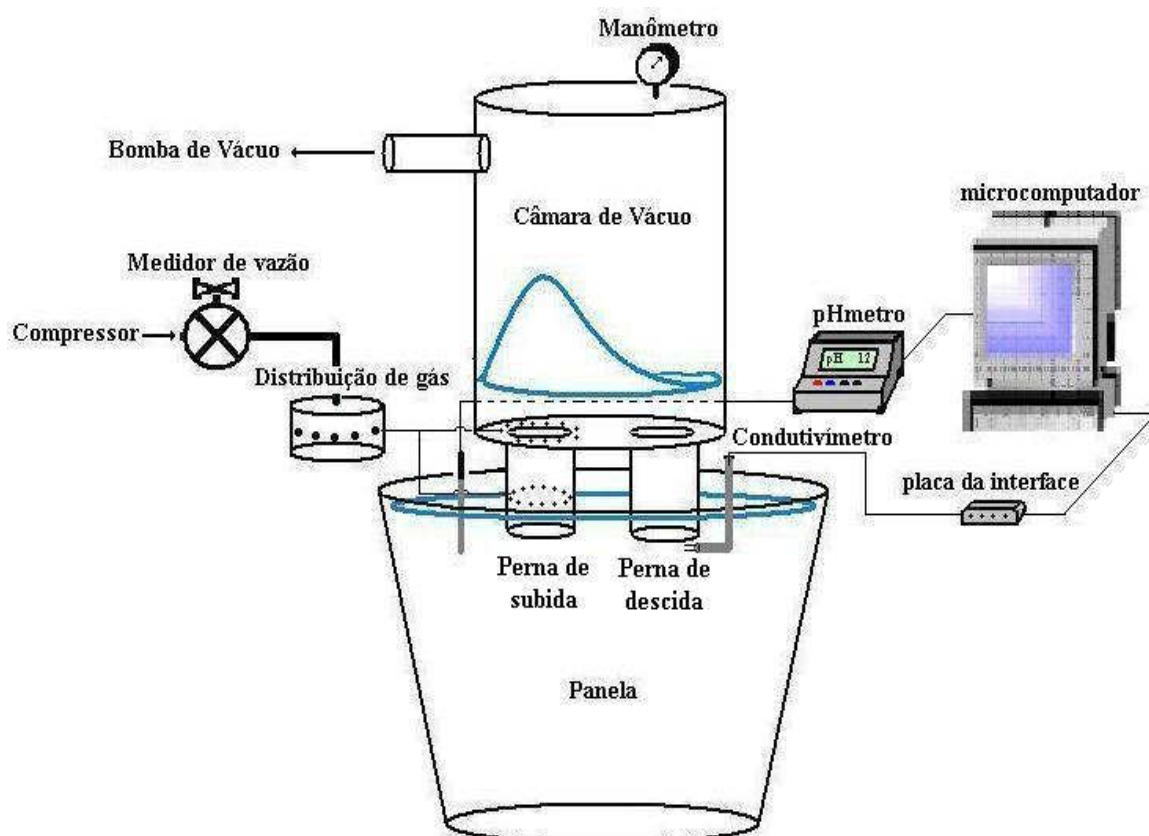


Figura 4.4 – Vista esquemática do modelo físico do reator RH com os sensores utilizados no teste.

Para realização de cada ensaio nas condições descritas, foram analisadas as diferentes combinações de vazões de gás injetado na perna de subida e na câmara de vácuo. Estes testes foram realizados até obtenção de 10 ensaios válidos com variação máxima de 5% no fechamento do balanço de massa do traçador.

Para o cálculo da taxa de circulação foi utilizada a técnica adotada por Vargas (2000). Nesta técnica, uma solução de cloreto de potássio é injetada no perna de subida. A concentração de KCl na perna de descida é, então, continuamente monitorada. Desde que a condutividade elétrica da água seja afetada pela presença de KCl, sua concentração é calculada baseada no sinal gerado.

Em cada ensaio foi obtida uma curva similar à mostrada na figura 4.5. Pode-se observar que a primeira área, onde se encontra o pico máximo de concentração, representa a primeira passagem do traçador no modelo. Na segunda passagem, a solução já mais diluída, forma uma elevação mais suavizada. Após algumas passagens, a

solução de KCl se dilui totalmente, estabilizando a condutividade medida em um patamar de concentração de traçador superior ao anterior à injeção.

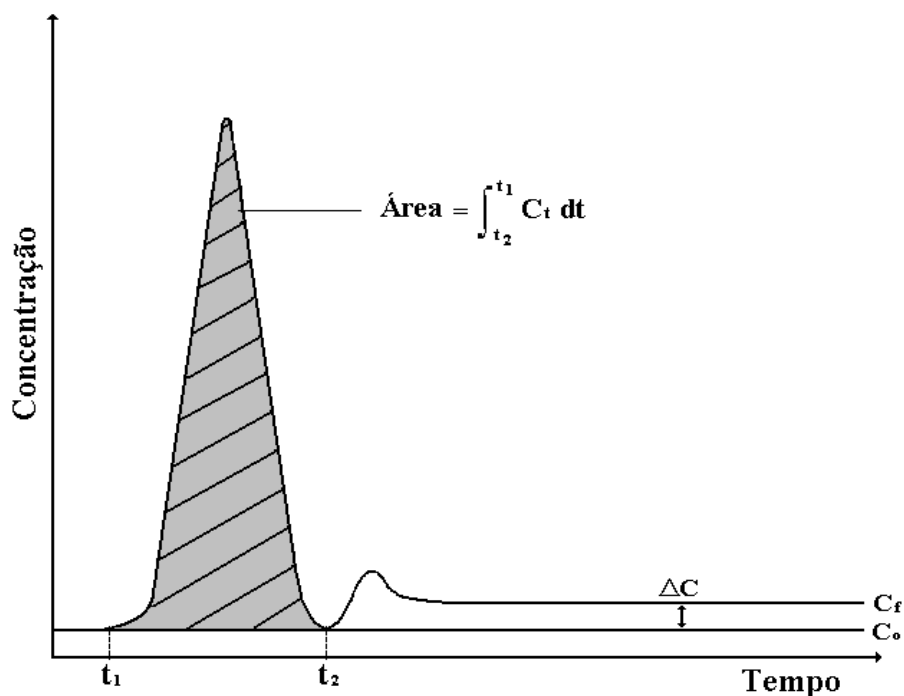


Figura 4.5 – Curva de distribuição de tempo de homogeneização, de onde são tirados os dados para se calcular a taxa de circulação (Vargas, 2000).

Aplicando o balanço de massa para o traçador adicionado, entre os tempos t_1 e t_2 da figura 4.5, encontra-se a massa total de traçador :

$$M_t = \int_{t_1}^{t_2} V_a \cdot C_t \cdot dt \quad (4.3)$$

Considerando V_a constante:

$$M_t = V_a \cdot A_{pico} \quad (4.4)$$

sendo:

V_a = Vazão do líquido (m^3/s);

C_t = Concentração do traçador (kg/m^3);

A_{pico} = Área da curva entre os pontos t_1 e t_2 ($kg.s/m^3$).

A diferença de concentração (ΔC) antes à adição e após adição de traçador é dada por:

$$\Delta C = \frac{M_t}{V_r} \quad (4.5)$$

Sabendo que:

$$V_r = V_a \cdot \tau \quad (4.6)$$

sendo:

V_r = Um volume de material de trabalho, recirculado (m^3);

τ = tempo necessário para circular um volume de trabalho, ou tempo de circulação (s).

Finalmente, a taxa de circulação (Q) pode ser determinada através da equação (4.7), onde W representa o volume de líquido contido na panela.

$$Q = W / \tau \quad (4.7)$$

Estes cálculos estão de acordo com alguns autores, tais como Martins e Silva (2003), Silva et al (2005), Almeida et al (2006) e Vargas (2000), que utilizaram traçadores para encontrar a taxa de circulação no aço líquido.

4.2.2. Taxa de descarburização

O presente estudo visa avaliar a cinética de descarburização no reator RH e o efeito de parâmetros operacionais sobre a cinética de descarburização. Para tal, foi empregada uma reação análoga à descarburização (Guo e Irons, 2000), que é a dessorção de CO_2 de soluções alcalinas. O método utilizado envolve a realização do seguinte procedimento:

- 1- Enchimento da panela RH com água até o nível pré-determinado para fazer os testes;
- 2- Elevação do pH da panela até pH ~ 12,0 ; que é obtida por adição de 100 g de NaOH dissolvido em 100ml de água quente;
- 3- Saturação da solução aquosa alcalina NaOH por insuflação de CO_2 na panela até pH 6,5;
- 4- Dessorção do CO_2 por insuflação de ar comprimido através da injeção na perna de subida e na câmara de vácuo;

- 5- Medida da variação da concentração de CO_2 resultante através do acompanhamento do pH no interior do RH, com sensor de pH instalado próximo à perna de subida. O sensor é conectado a uma placa de aquisição de dados, que por sua vez faz interface com o programa de computador, onde os dados de cada ensaio são armazenados e processados;
- 6- Processamento dos dados para avaliação da cinética de dessorção do CO_2 (similar a descarburização).

Os ensaios foram realizados com 3 repetições para verificação da repetibilidade. As condições dos testes são mostradas na tabela IV.2.

A soma das vazões de gás na câmara de vácuo e na perna de subida foi mantida constante em 500 litros por minuto, devido a uma limitação na alimentação de gás pelo compressor.

Tabela IV.2 – Configurações de vazões de gás na perna de subida e na câmara de vácuo.

Vazão de Gás Injetado na Perna de Subida (l/min)	Vazão de Gás Injetado na Câmara de Vácuo (l/min)
50	450
100	400
150	350
200	300
250	250
300	200
350	150
400	100
450	50

A aquisição de dados para obter a taxa de descarburização é feita através de um medidor de pH (Quimis), com o sensor de pH situado próximo à perna de subida. Outras localizações do sensor de pH foram testadas sem qualquer diferença em relação às constantes cinéticas da reação de descarburização. O sensor é conectado a uma placa de aquisição de dados, que por sua vez faz interface com o programa de computador, onde os dados de cada ensaio são armazenados e processados. A fixação do eletrodo de

temperatura e pH é feita por um suporte que está localizado próximo à perna de subida. As posições e profundidades dos eletrodos são apresentados na tabela IV.3 e estão representados na figura 4.6 e 4.7.

Tabela IV.3 – Localizações dos eletrodos de pH e temperatura

Parâmetros	Símbolos	Valores
Eletrodo de pH		
- distância em relação à panela (m)	a	0,130
- distância em relação à perna de subida (m)	x	0,075
- profundidade de imersão no momento do ensaio (m)	z	0,058
Eletrodo de Temperatura		
- distância em relação à panela (m)	b	0,140
- distância em relação à perna de subida (m)	y	0,050
- profundidade de imersão no momento do ensaio (m)	w	0,072



Figura 4.6. – Profundidade de imersão dos eletrodos de temperatura e pH.

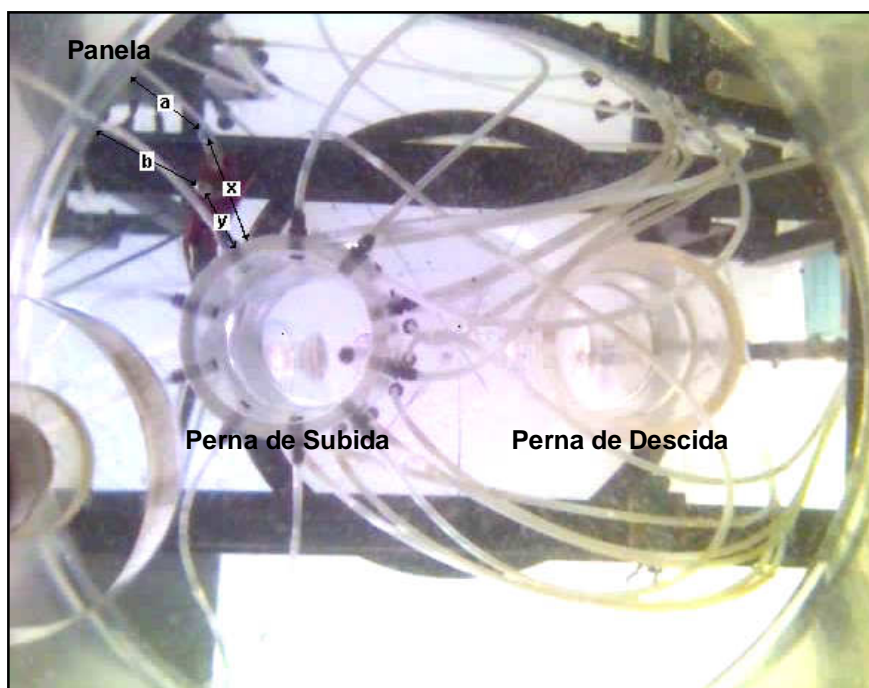


Figura 4.7 – Vista de baixo do modelo físico desgaseificador RH com a posição dos eletrodos de pH e temperatura próximos à perna de subida.

Após determinar uma curva de calibração relacionando a concentração de $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ em função do pH, obtém-se um gráfico de concentração de $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ em função do tempo. Foi assumido que a taxa de dessorção de $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ pudesse ser expressa pela equação de primeira ordem:

$$-\frac{dC_{\text{CO}_{2(\text{aq})}}}{dt} = K.(C_{\text{CO}_{2(\text{aq})}} - C_{\text{CO}_{2(\text{aq})}}^{\text{eq}}) \quad (4.8)$$

onde:

K = constante cinética da reação (s^{-1});

t = tempo (s);

$C_{\text{CO}_{2(\text{aq})}}$ = concentração de CO_2 aquoso na panela (mg/l);

$C_{\text{CO}_{2(\text{aq})}}^{\text{eq}}$ = concentração de CO_2 aquoso na panela no equilíbrio (mg/l).

A equação 4.8 pode ser integrada, obtendo-se a equação 4.9:

$$-\ln\left(\frac{C_{\text{CO}_{2(\text{aq})}} - C_{\text{CO}_{2(\text{aq})}}^{\text{eq}}}{C_{\text{CO}_{2(\text{aq})}}^i - C_{\text{CO}_{2(\text{aq})}}^{\text{eq}}}\right) = K.t \quad (4.9)$$

Onde $C_{\text{CO}_{2(\text{aq})}}^i$ é a concentração inicial do $\text{CO}_{2(\text{aq})}$.

A figura 4.8 apresenta uma representação gráfica da equação 4.9, com dados de um dos ensaios realizados. A inclinação da reta fornece o valor do parâmetro cinético, indicando que os resultados são consistentes para controle do transporte de massa na interface líquida.

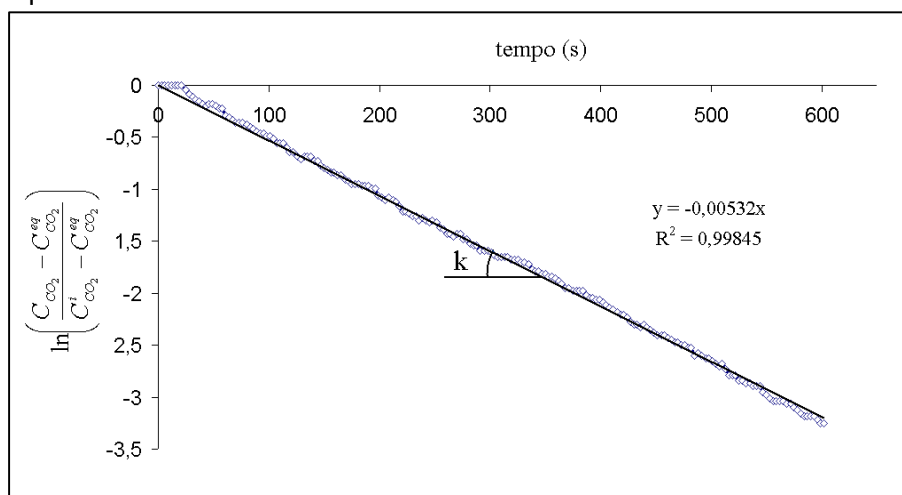


Figura 4.8 – Representação gráfica da equação 4.9 com dados de um dos ensaios realizados.

4.2.3. Tratamento das imagens da câmara de vácuo

A intensidade das reações de descarburização e de desgaseificação, que ocorrem no interior da câmara de vácuo do desgaseificador RH, está diretamente ligada à área de contato metal/gás durante o processo (Kishimoto et al, 1993).

Para fazer uma comparação qualitativa da área de contato metal/gás nas diferentes condições de ensaio, foram feitas filmagens dos ensaios. A partir destas filmagens, foram obtidas imagens em intervalos de 1 segundo, num total de 15 imagens. Para condição experimental, foram escolhidas as dez melhores imagens para serem tratadas. O critério estabelecido foi baseado na escolha das imagens que não possuísem qualquer interferência visual, tal como imagens ofuscadas, geralmente do início ou final da filmagem de uma sequência de vazões.

Um programa de domínio público denominado Image J (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>) foi utilizado para calcular a área das imagens. O padrão de tratamento das imagens foi escolhido de forma a identificar a área da pluma na câmara de vácuo para todos bicos e vazões. A figura 4.9 mostra o padrão utilizado para o tratamento, onde a área de cor branca representa a pluma e os “splashes” e a área de cor preta representa o líquido no

interior da câmara de vácuo. Neste caso, foram utilizados bicos de 1 milímetro na câmara de vácuo com vazão de 50 l/min e bicos de 2,2 milímetros na perna de subida com vazão de 450 l/min.

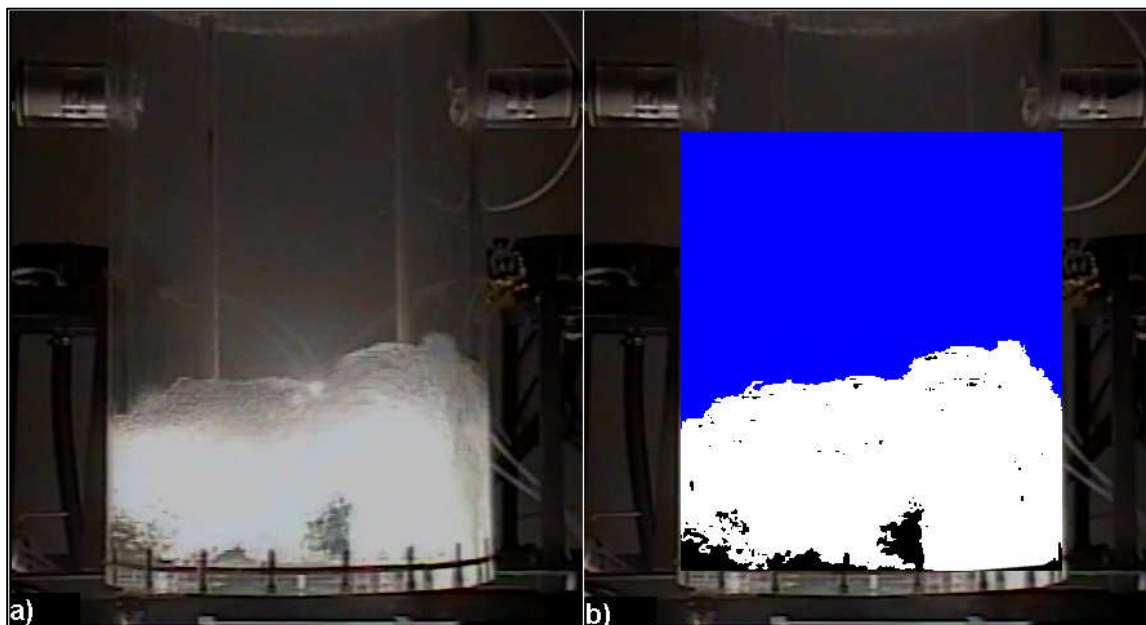


Figura 4.9 – Padrão utilizado para o tratamento de dados de imagem com o programa de domínio público Image J. Sendo que em b), representa-se a área tratada em a).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios com o modelo físico. Inicialmente será analisado o efeito da injeção de gás na câmara de vácuo sobre a taxa de circulação. Posteriormente, será discutido o efeito desta injeção sobre a constante cinética de descarburização. Finalmente, a variação do coeficiente volumétrico de transferência de massa nas diferentes condições de injeção de gás será analisada, buscando determinar uma condição que otimize a taxa de descarburização.

5.1. Efeito da Injeção de Gás na Câmara de Vácuo sobre a Taxa de Circulação

Inicialmente é importante lembrar que nos ensaios com injeção de gás na câmara de vácuo, a vazão total (perna de subida e câmara de vácuo) foi mantida constante em 500l/min (medida nas condições padrão: $T = 25^{\circ}\text{C}$ e $P = 1 \text{ atm}$).

Para analisar injeção de gás na câmara de vácuo foram traçadas curvas tridimensionais (figuras 5.1 a 5.4), com o objetivo de se encontrar uma configuração ótima de injeção. Para isso foram considerados os diâmetros dos bicos da perna de subida, a vazões de gás na câmara de vácuo e as taxas de circulação, considerando para todas configurações a vazão total de gás de 500l/min. Para efeito de comparação são apresentados também os dados obtidos por Almeida et al (2006), com injeção de gás apenas na perna de subida. No gráfico estes resultados estão representados pela vazão de 0l/min na câmara de vácuo, sendo a vazão na perna de subida de 500l/min.

Para uma melhor análise do efeito da injeção de gás na câmara de vácuo na taxa de circulação, e, devido ao grande número de ensaios realizados, a discussão dos resultados será separada em itens, de acordo com o diâmetro dos bicos de injeção na câmara de vácuo. Posteriormente, será apresentada uma análise geral desses resultados, bem como a discussão dos resultados ótimos.

5.1.1. Bicos de 1 milímetro de diâmetro na câmara de vácuo

A figura 5.1 apresenta os valores da taxa de circulação com a injeção de gás na câmara de vácuo para os bicos de 1,0; 1,5; 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida, com bicos de 1 milímetro na câmara de vácuo.

Nota-se em todos os diâmetros de bicos na perna de subida, que após atingir um valor máximo e posteriormente uma ligeira queda na taxa de circulação, estas se mantiveram constantes. Este efeito pode ser explicado por um maior arraste do líquido pelo gás injetado na perna de subida. Para vazões mais elevadas, a taxa de circulação cai, pois a perna de subida passa a ser ocupada por um grande volume de gás e a quantidade de líquido arrastado tende a diminuir.

Para os resultados apresentados na figura 5.1 com a injeção na câmara de vácuo com bicos de 1mm na perna de subida, nota-se que a injeção de gás na câmara de vácuo possui um melhor resultado nas vazões de 250 l/min na perna de subida e 250 l/min na câmara de vácuo, comparando-se com a vazão de 500l/min para a injeção de gás apenas na perna de subida. A explicação para este efeito é que com a injeção de gás na câmara de vácuo, evita-se a injeção de uma grande quantidade de gás na perna de subida ocorrendo uma melhora na taxa de circulação. Hanna et al (1994) estudaram o efeito da injeção simultânea de gás em duas e em três posições para vazões constantes, encontrando melhoras na taxa de circulação com a injeção simultânea de gás em diferentes posições quando se mantém a vazão constante. Estes mesmos autores observaram que existia uma interação entre as bolhas das diferentes posições de injeção de gás, onde puderam perceber que as bolhas da região inferior tinham uma maior penetração em relação às bolhas da região superior.

Com a injeção na câmara de vácuo com bicos de 1,5mm na perna de subida. Nota-se que com a injeção na câmara de vácuo, a taxa de circulação se manteve aproximadamente constante a partir de 300l/min na perna de subida e 200l/min na câmara de vácuo. Para esta configuração de bicos, foi possível obter taxas de circulação mais elevadas distribuindo a injeção de gás na perna de subida e câmara de vácuo.

Com a injeção de gás na câmara de vácuo sobre a taxa de circulação utilizando bicos com diâmetros de 2,2 mm na perna de subida. O efeito da injeção na câmara de vácuo não demonstrou efeito positivo em relação à injeção de gás apenas na perna de subida. Além dos resultados já percebidos do efeito da injeção de gás na perna de subida na taxa de circulação, foi observado também, que para altas vazões de gás na câmara de vácuo, a taxa de circulação se manteve menor que a injeção apenas na perna de subida. Este efeito pode ser explicado devido à interação entre as bolhas das diferentes posições de injeção influenciar negativamente na taxa de circulação (Hanna et al, 1994). Com isso o gás injetado na câmara de vácuo funciona como um inibidor ao gás que ascende da região inferior, diminuindo a transferência de energia da ascensão do gás injetado na

perna de subida para o líquido. Este efeito foi acompanhado de uma menor agitação no interior da câmara de vácuo.

Com bicos de 2,8mm na perna de subida não se obteve efeito positivo, sendo que a maior taxa de circulação foi para injeção apenas na perna de subida na vazão 500l/min, representado no gráfico pela vazão de 0l/min (Vazão na C.V.).

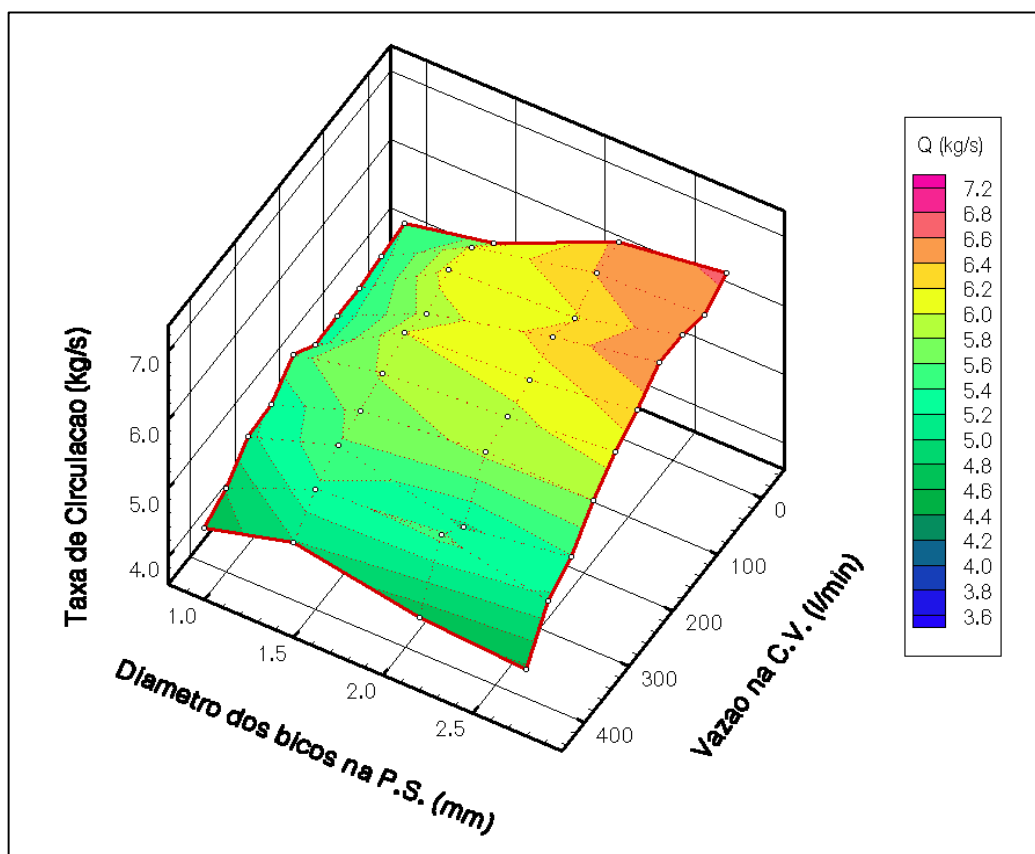


Figura 5.1 – Análise da taxa de circulação com a injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo com bicos de 1mm.

5.1.2. Bicos de 1,5 milímetro de diâmetro na câmara de vácuo

A figura 5.2 apresenta os valores da taxa de circulação com a injeção de gás na câmara de vácuo para os bicos de 1,0; 1,5; 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida, com bicos de 1,5 milímetro na câmara de vácuo.

Os efeitos discutidos para os bicos de 1,5 milímetro na câmara de vácuo são os mesmos observados para todos os outros bicos de injeção na câmara de vácuo. Permitindo-se fazer uma discussão mais prática utilizando a discussão dos resultados com bicos de 1mm na câmara de vácuo como referência.

Os resultados apresentados na figura 5.2 mostram os efeitos da injeção na câmara de vácuo com bicos de 1mm na perna de subida. Nota-se que, com a injeção na câmara de vácuo, a taxa de circulação obteve um valor máximo nas vazões de 350l/min na perna de subida e 150l/min na câmara de vácuo, sendo superior em relação à injeção apenas na perna de subida com vazão de 500l/min.

Com a injeção na câmara de vácuo com bicos de 1,5mm na perna de subida. Percebe-se que a injeção na câmara de vácuo possui um efeito positivo para vazões desde 250l/min na perna de subida e 250l/min na câmara de vácuo, até 350l/min na perna de subida e 150l/min na câmara de vácuo, em se comparado com a vazão de 500l/min apenas na câmara de vácuo. Também, nota-se os efeitos citados na figura 5.1 para as altas vazões de gás na perna de subida e na câmara de vácuo.

A injeção de gás na câmara de vácuo sobre a taxa de circulação utilizando bicos com diâmetros de 2,2 milímetros na perna de subida observados na figura 5.1 possui uma grande semelhança com os resultados apresentados na figura 5.2, inclusive os valores obtidos nas curvas. O mesmo pode ser observado para os bicos de 2,8 milímetros de diâmetros nestas curvas.

Observando estes resultados parecidos, percebe-se que a variação de diâmetro dos bicos na câmara de vácuo não surtiu efeito positivo na taxa de circulação, considerando um mesmo diâmetro de bico na perna de subida.

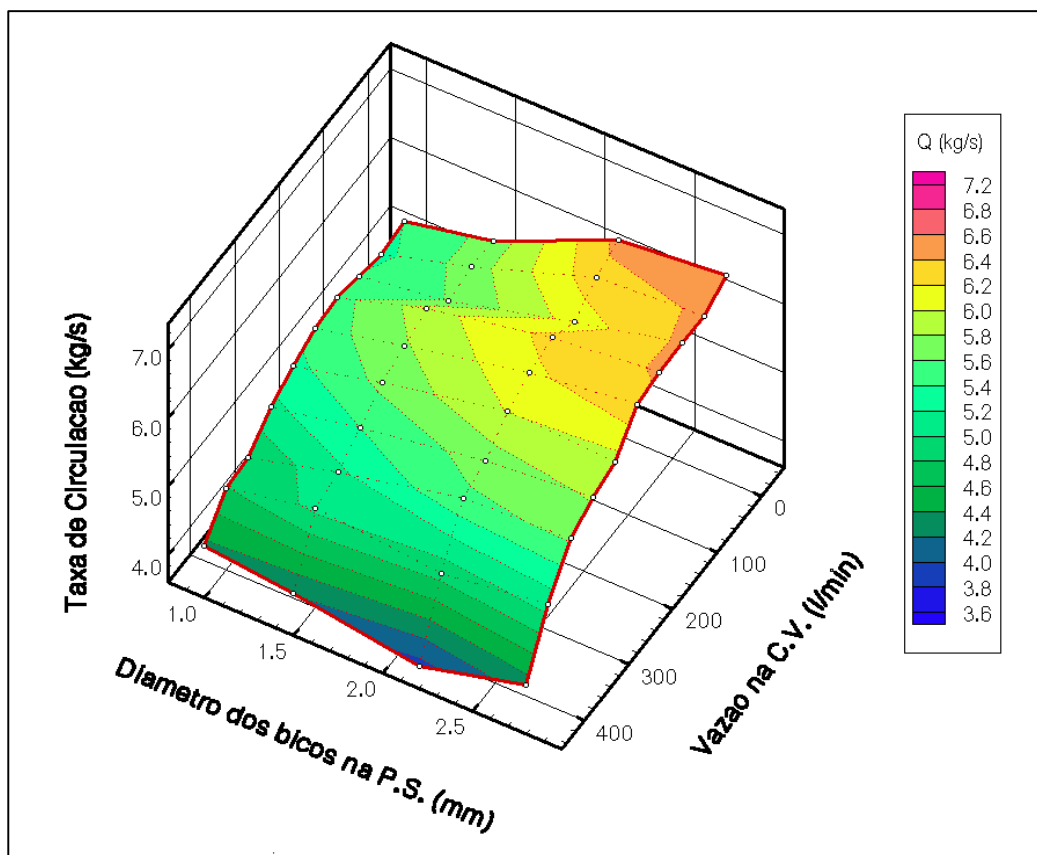


Figura 5.2 – Análise da taxa de circulação com a injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo com bicos de 1,5 mm.

5.1.3. Bicos de 2,2 milímetros de diâmetro na câmara de vácuo

A figura 5.3 apresenta os valores da taxa de circulação com a injeção de gás na câmara de vácuo para os bicos de 1,0; 1,5; 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida, com bicos de 2,2 milímetros na câmara de vácuo.

Considerando os efeitos e os indícios expostos nos itens 5.1.1 e 5.1.2, este item será breve e fazendo referência aos resultados já apresentados. As considerações de que os diâmetros dos bicos na câmara de vácuo não possuem grande influência na taxa de circulação também serão notadas neste item.

Para os bicos de 1mm na perna de subida, nota-se que não ocorreu um máximo na taxa de circulação nem sequer efeito positivo com a injeção na câmara de vácuo, mas mesmo assim há semelhança aos resultados da figura 5.1, que considera a injeção na

câmara de vácuo com bicos de 1mm. Observa-se que se o ponto de vazão de 250l/min na câmara de vácuo e de 250l/min na perna de subida for suprimido, as curvas com injeção na câmara de vácuo possuem resultados muito próximos.

Com bicos na perna de subida de 2,2 milímetros, observa-se na figura nitidamente o efeito positivo da injeção na câmara de vácuo, entre as vazões de 50l/min e 150l/min na câmara de vácuo. Este efeito não se assemelha com os outros pontos quando de relaciona o diâmetro dos bicos na perna de subida. Sendo este a melhor combinação de bicos (2,2mm na perna de subida e 2,2mm na câmara de vácuo) se comparado os diâmetros dos bicos na câmara de vácuo.

Os resultados com bicos de 2,8mm na perna de subida. Há semelhança com as figuras 5.1 e 5.2, percebendo que os resultados são praticamente os mesmos.

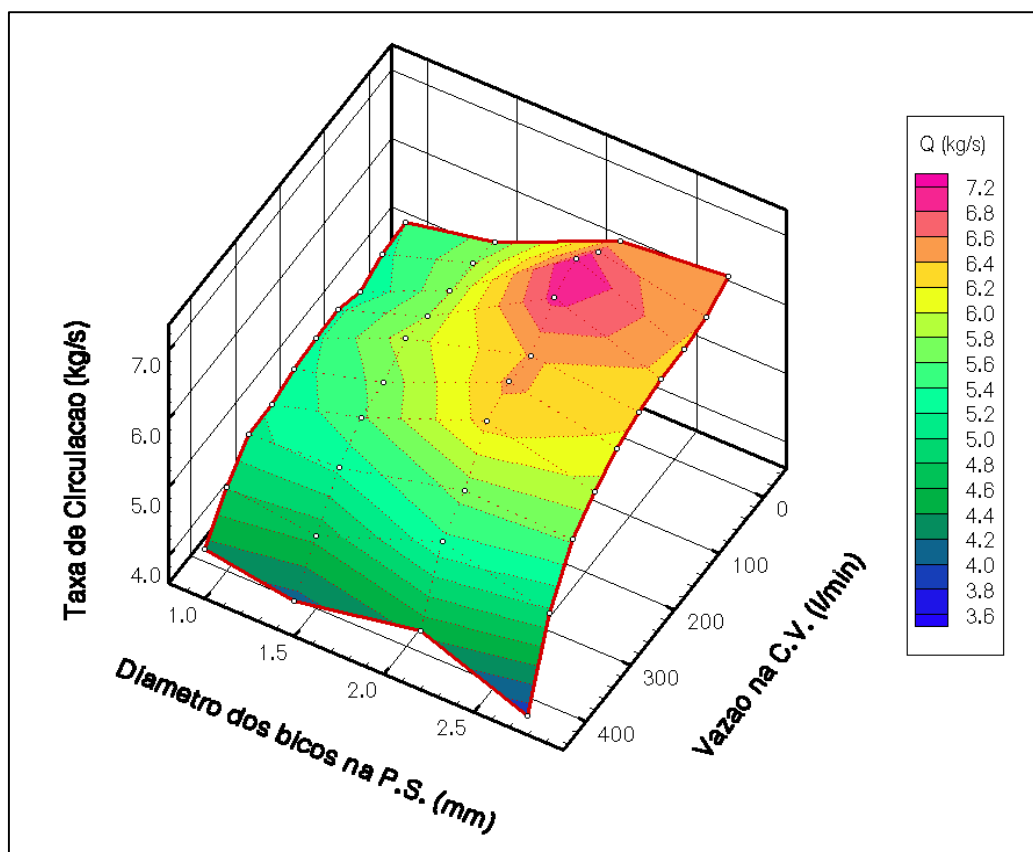


Figura 5.3 – Análise da taxa de circulação com a injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo com bicos de 2,2mm.

5.1.4. Bicos de 2,8 milímetros de diâmetro na câmara de vácuo

A figura 5.4 apresenta os valores da taxa de circulação com a injeção de gás na câmara de vácuo para os bicos de 1,0; 1,5; 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida, com bicos de 2,8 milímetros na câmara de vácuo.

O efeito positivo da injeção na câmara de vácuo, com bicos de 1mm na perna de subida, pode ser notado a partir da vazão de 250l/min na perna de subida e 250l/min na câmara de vácuo em relação com a vazão de 500l/min apenas na perna de subida. Estes resultados apresentaram semelhança com os da figura 5.2, que considera a injeção na câmara de vácuo com bicos de 1,5mm.

Para os bicos de 1,5; 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida, a não ser para algumas configurações de vazões, os resultados foram muito próximos, sendo os efeitos os mesmos.

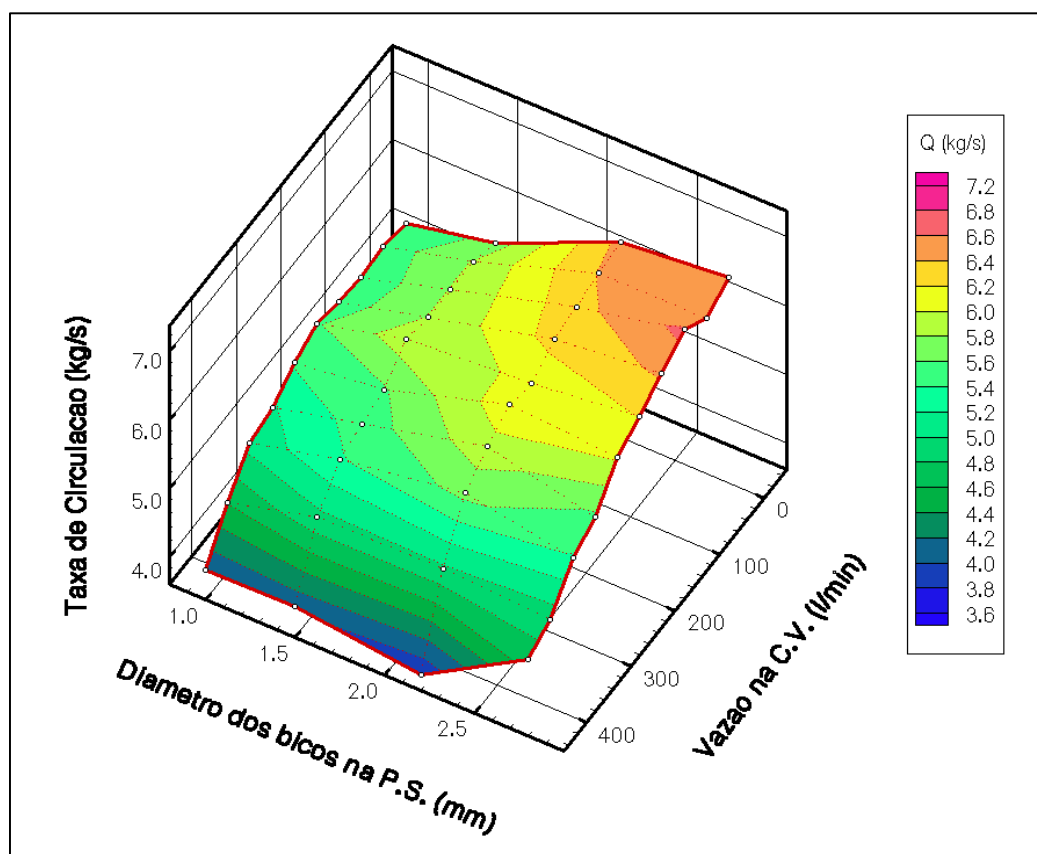


Figura 5.4 – Análise da taxa de circulação com a injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo com bicos de 2,8mm.

5.1.5 – Análise dos resultados da taxa de circulação com o efeito da injeção na câmara de vácuo

Para os resultados apresentados com injeção de gás na câmara de vácuo, a taxa de circulação tendeu a se manter constante a partir de uma determinada vazão máxima. Este mesmo efeito foi observado por outros autores (Vargas, 2000; Park et al, 2001; Silva et al, 2004; Almeida et al, 2006, entre outros), levando em consideração a injeção apenas na perna de subida. Este efeito pode ser explicado por um maior arraste do líquido pelo gás injetado na perna de subida. Para vazões mais elevadas, a taxa de circulação cai, pois a perna de subida passa a ser ocupada por um grande volume de gás e a quantidade de líquido arrastado tende a diminuir. Foi observado que em alguns casos esse efeito na taxa de circulação culminou com um pico na curva. As tabelas V.1 e V.2 mostram os resultados das vazões que podem ter melhora na taxa de circulação, com a injeção na câmara de vácuo.

As taxas de circulação, tanto para os ensaios com ou sem injeção de gás na câmara de vácuo, se elevaram com o aumento dos diâmetros dos bicos de injeção de gás na perna de subida. Enquanto que os diâmetros de bicos na câmara de vácuo não demonstraram grande relevância em relação à taxa de circulação.

Em relação às grandes vazões de gás na câmara de vácuo obter resultados de taxas de circulação menores que para a injeção apenas na perna de subida. Nota-se que nestes casos, a injeção na câmara de vácuo funciona como um inibidor ao gás que ascende da região inferior, diminuindo a transferência de energia da ascensão do gás injetado na perna de subida para o líquido. Este efeito foi acompanhado de uma menor agitação no interior da câmara de vácuo.

A figura 5.1 apresenta os resultados para os bicos de 1mm na câmara de vácuo. Pode-se notar que o melhor resultado está no sentido de maiores diâmetros dos bicos de injeção na perna de subida e menores vazões de gás na câmara de vácuo. Os piores resultados de taxa de circulação foram para altas vazões de gás na câmara de vácuo. Notou que a melhor taxa de circulação encontrada foi para a injeção de gás apenas na perna de subida com o bico de 2,8mm. Essas mesmas observações servem para a figura 5.2 para os resultados de 1,5mm na câmara de vácuo. Na figura 5.3, para os bicos de 2,2mm na câmara de vácuo, nota-se as mesmas tendências observadas para os outros resultados, mas com o melhor resultado encontrado para a injeção na câmara de vácuo com vazão de 100l/min. Esta configuração se mostrou benéfica em todas combinações se

comparado com outros bicos na perna de subida. A figura 5.4 que representa os bicos de 2,8mm na câmara de vácuo, segue as mesmas tendências, mas mostra o pior resultado apresentado com bicos de 2,2mm e vazão de 450l/min na câmara de vácuo. A região ótima está nos bicos de maior diâmetro e baixas vazões de gás na câmara de vácuo, mostrando seu melhor resultado no bico de 2,8mm e vazão na câmara de vácuo de 100l/min.

Considerando os resultados apresentados, nota-se que a injeção de gás na câmara de vácuo não teve resultado positivo na taxa de circulação, pois tem pouco potencial de arraste de líquido. Entretanto, pode-se perceber que os resultados das taxas de circulação para os diferentes ensaios estão muito próximos, principalmente se considerar os mesmos diâmetros de bicos na perna de subida, pois se considerado a dispersão dos resultados, não se pode afirmar que os resultados de comparação entre as taxas de circulação dos ensaios com injeção na câmara de vácuo e ensaios com injeção apenas na perna de subida sejam estatisticamente diferentes. Mesmo considerando as configurações de bicos onde se obteve as taxas de circulação mais elevadas.

Tabela V.1 – Resultados da injeção de gás na câmara de vácuo com bicos de injeção de gás com diâmetro de 1 e 1,5 milímetros.

Combinação dos bicos que obtiveram benefício com a injeção na câmara de vácuo		Combinação das vazões onde ocorreu o benefício com a injeção na câmara de vácuo	Taxa de circulação (l/s) (vazão total de gás de 500l/min)	
Câmara de Vácuo (mm)	Perna de Subida (mm)	Câmara de Vácuo (l/min)	Câmara de vácuo + Perna de Subida	Perna de Subida
1	1	250	5,54±0,19	5,40±0,17
	1,5	250	5,82±0,22	5,67±0,27
		200	6,00±0,22	
		150	5,87±0,24	
		100	6,10±0,22	
		50	6,02±0,14	
1,5	1	200	5,48±0,22	5,40±0,17
		150	5,52±0,18	
		100	5,42±0,17	
	1,5	200	5,78±0,20	5,67±0,27
		150	5,91±0,16	

Tabela V.2 – Resultados da injeção de gás na câmara de vácuo com bicos de diâmetros de 2,2 e 2,8 milímetros.

Combinação dos bicos que obtiveram benefício com a injeção na câmara de vácuo		Vazões onde ocorreu o benefício com a injeção na câmara de vácuo (l/min)	Taxa de circulação (l/s) (vazão total de gás de 500l/min)	
Câmara de Vácuo (mm)	Perna de Subida (mm)		Câmara de vácuo + Perna de Subida	Perna de Subida
2,2	1,5	200	5,90±0,16	5,67±0,27
		150	5,81±0,22	
		100	5,78±0,16	
	2,2	200	6,42±0,16	6,46±0,41
		150	6,86±0,35	
2,8	1	250	5,42±0,21	5,40±0,17
		200	5,58±0,34	
		150	5,49±0,13	
		100	5,43±0,16	
		50	5,48±0,16	
	1,5	200	5,91±0,20	5,67±0,27
		150	5,81±0,21	
		100	5,82±0,24	
		50	5,81±0,22	
	2,8	100	6,66±0,26	6,66±0,16

5.2. Efeito da Injeção de Gás na Câmara de Vácuo na Cinética de Descarburização

As figuras de 5.5 a 5.9, apresentam os valores da constante cinética com a injeção de gás na câmara de vácuo. Para efeito de comparação são apresentados também os dados obtidos com injeção de gás apenas na perna de subida na vazão de 500l/min (Almeida et al, 2006). Estes resultados do parâmetro cinético são representados na vazão de 0l/min na câmara de vácuo.

A apresentação e discussão dos resultados serão feitas de forma semelhante à utilizada na seção 5.1, ou seja, separados em tópicos, de acordo com o diâmetro dos bicos de injeção na câmara de vácuo. Posteriormente, será apresentada uma análise geral desses resultados.

5.2.1. Bicos de 1 milímetro de diâmetro na câmara de vácuo

A figura 5.5 demonstra o efeito da injeção de gás sobre o parâmetro cinético da reação de descarburização, utilizando bicos de 1 milímetro de diâmetro na câmara de vácuo e 1; 1,5; 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida, respectivamente.

Nota-se que a injeção de gás na câmara de vácuo e perna de subida com bicos de 1 milímetro apresentou efeito positivo na descarburização para a maioria das combinações de vazões, a não ser para a combinação de vazões de 50l/min na câmara de vácuo e 450l/min na perna de subida, e para a combinação de vazões de 150l/min na câmara de vácuo e 350l/min perna de subida. Para vazões de 50l/min na câmara de vácuo e 450l/min na perna de subida até 300l/min na câmara de vácuo e 200l/min na perna de subida, os resultados se mostraram superiores se comparados com a injeção apenas na perna de subida, como é visto na figura 5.6. Isto ocorre devido ao aumento da área de reação nos sítios de reação utilizando esta configuração: a área da superfície exposta ao vácuo, área superficial das bolhas e projeção de líquido no interior da câmara de vácuo (*splashes*).

Para bicos de 1,5mm na perna de subida, nota-se que constante cinética sofreu pouca variação para vazões até a vazão de 200l/min na perna de subida e 300l/min na câmara de vácuo, e, a partir dessa combinação de vazões ocorreu um acréscimo na constante cinética, mas sem efeito significativo em relação à injeção apenas na perna de subida.

Para os bicos de 2,2mm na perna de subida, as mesmas observações para os bicos de 1,5mm podem ser notadas, mas apenas que os intervalos das constantes cinéticas das duas combinações foram diferentes.

Utilizando-se bicos de 2,8mm na perna de subida, nota-se que além de não surtir efeito positivo da injeção de gás na câmara de vácuo, observou-se uma tendência à queda da constante cinética de descarburização para altas vazões na câmara de vácuo. Este efeito foi observado na seção 5.1.1, e ele ocorre devido à interação entre as bolhas dos diferentes níveis de injeção, sendo que o gás injetado na câmara de vácuo funciona como um inibidor ao gás que ascende da região inferior, diminuindo a transferência de energia da ascensão do gás injetado na perna de subida para o líquido, com isso ocorre a diminuição da área de transferência de massa líquido/gás. Considerando que, a agitação na câmara de vácuo diminui, assim como a quantidade de “*splashes*” que favorece a reação.

Outro efeito observado, é que para altas vazões de gás, as bolhas não se formam completamente, formando a pluma, com isso a área de reação também diminui. Este efeito somado com a sobreposição das plumas dos bicos adjacentes diminui a área de reação. Outro fator que também influencia é o diâmetro dos bicos na formação de uma pluma mais espessa.

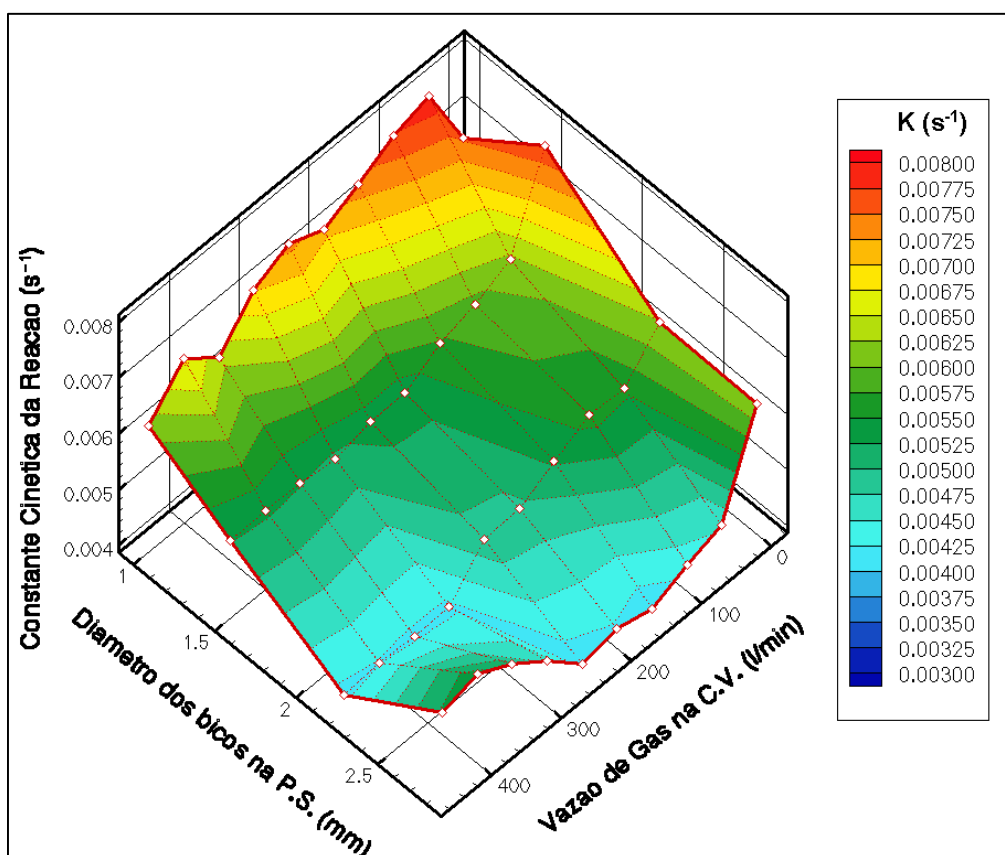


Figura 5.5 – Análise da constante cinética de reação com injeção de gás na câmara de vácuo com bicos de 1mm. CV significa câmara de vácuo e PS perna de subida.

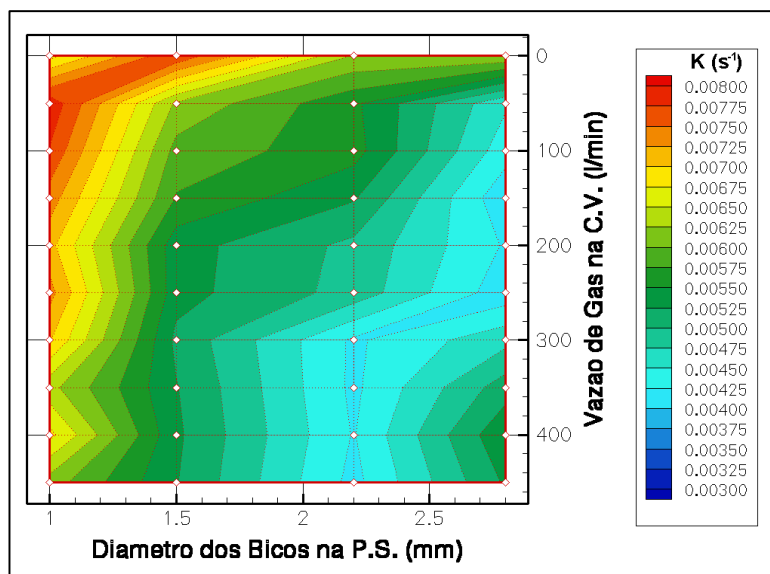


Figura 5.6 – Vista de planta da figura 5.5.

5.2.2 Bicos de 1,5 milímetro de diâmetro na câmara de vácuo

A figura 5.7 demonstra o efeito da injeção de gás sobre o parâmetro cinético da reação de descarburização, utilizando bicos de 1,5 milímetros de diâmetro na câmara de vácuo e 1; 1,5; 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida, respectivamente.

Para os bicos de 1mm na perna de subida, apesar de se observar que a constante ad reação ascende, a injeção de gás na câmara de vácuo não teve resultado positivo se comparado com a vazão de 500l/min com injeção apenas na perna de subida. Nota-se também que quando se diminuiu o diâmetro dos bicos na câmara de vácuo mantendo o diâmetro na perna de subida fixo, os resultados da constante cinética também caíram.

Nos bicos de 1,5mm na perna de subida, mostra-se os resultados da constante cinética se manteve entre $0,0030$ e $0,0055 \text{ min}^{-1}$, não demonstrando efeito positivo com a injeção de gás na câmara de vácuo. O mesmo efeito da queda da constante cinética quando se diminui o diâmetro dos bicos na câmara de vácuo pode ser notado. Na figura para os bicos de 2,2mm na perna de subida, pode-se notar o mesmo efeito, no qual a constante cinética se mantém praticamente constante.

Para bicos de 2,8mm na perna de subida, se observou que a injeção na câmara de vácuo não teve efeito positivo e com tendência à queda na constante cinética à medida que a vazão de gás na câmara de vácuo diminuía. Este efeito também foi observado na figura 5.4, com bicos de 1mm na câmara de vácuo.

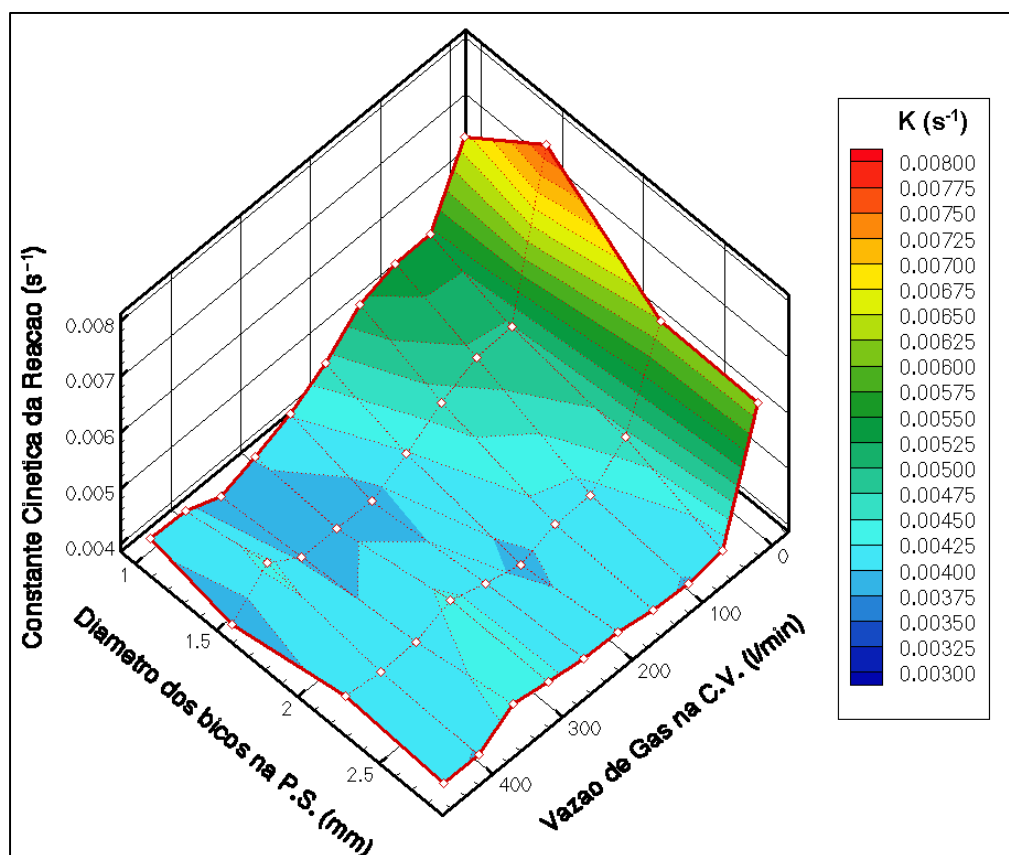


Figura 5.7 – Análise da constante cinética da reação com injeção de gás na câmara de vácuo com bicos de 1,5mm. CV significa câmara de vácuo e PS perna de subida.

5.2.3. Bicos de 2,2 milímetros de diâmetro na câmara de vácuo

A figura 5.8 demonstra o efeito da injeção de gás sobre o parâmetro cinético da reação de descarburção, utilizando bicos de 2,2 milímetros de diâmetro na câmara de vácuo e 1; 1,5; 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida, respectivamente.

Para bicos de 1mm na perna de subida, nota-se que apesar de uma evolução na constante cinética de reação com o aumento da vazão na perna de subida e decréscimo na câmara de vácuo, os resultados com a injeção na câmara de vácuo ficaram abaixo da vazão de 500l/min com injeção apenas na perna de subida.

Com os bicos de 1,5mm na perna de subida, nota-se que a constante cinética se manteve em um patamar entre $0,0035$ e $0,0055\text{s}^{-1}$, sem demonstrar efeito positivo com a injeção na câmara de vácuo.

Para bicos de 2,2mm na perna de subida, nota-se que para a medida que se diminui a vazão na câmara de vácuo e aumenta na perna de subida, a constante cinética possui seu menor valor em 250l/min na perna de subida e 250l/min na câmara de vácuo. A diminuição na constante cinética foi explicada no item 5.1.1, ser devido à inibição do escoamento da injeção de gás na perna de subida por altas vazões de gás na câmara de vácuo, diminuindo a área de reação na pluma.

Para bicos de 2,8mm na perna de subida, nota-se como a constante cinética foi praticamente constante, com flutuações por volta do valor de $0,004 \text{ min}^{-1}$, enquanto que para a injeção na apenas na perna de subida, a constante cinética esteve acima de $0,006 \text{ min}^{-1}$.

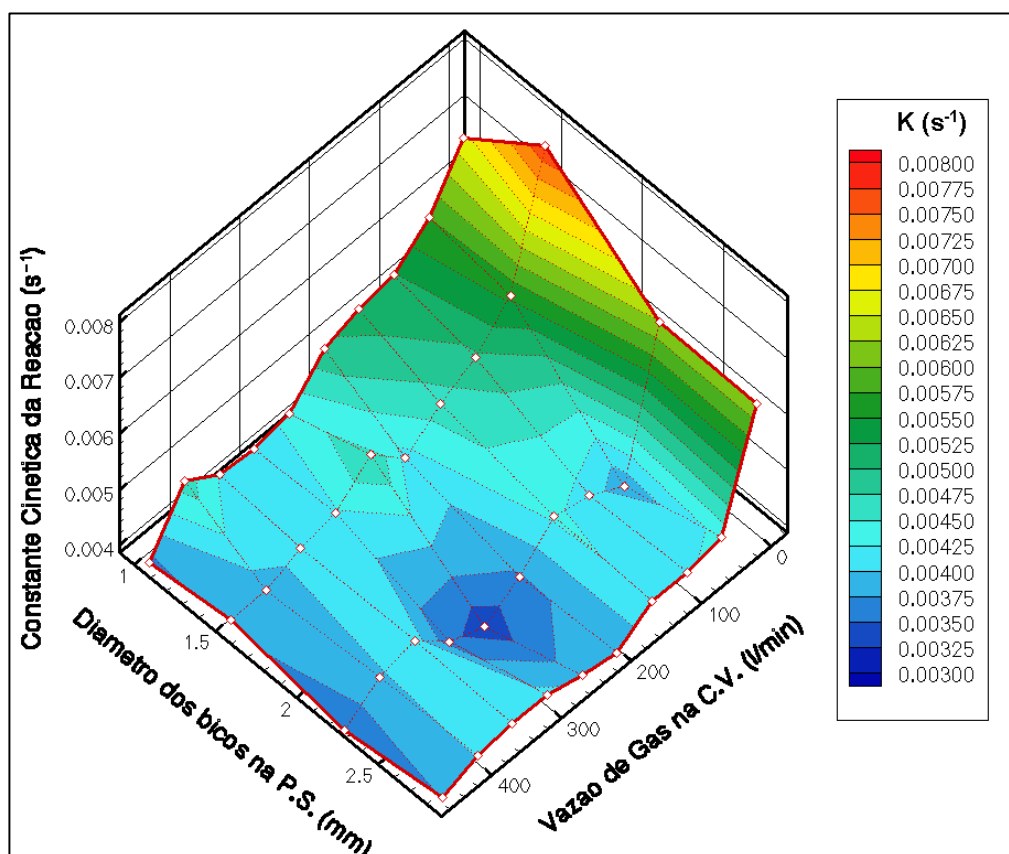


Figura 5.8 – Análise da constante cinética da reação com injeção de gás na câmara de vácuo com bicos de 2,2mm. CV significa câmara de vácuo e PS perna de subida.

5.2.4. Bicos de 2,8 milímetros de diâmetro na câmara de vácuo

A figura 5.9 demonstra o efeito da injeção de gás sobre o parâmetro cinético da reação de descarburização, utilizando bicos de 2,8 milímetros de diâmetro na câmara de vácuo e 1; 1,5; 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida, respectivamente.

Utilizando-se bicos de 1 mm na perna de subida, observou-se que com o aumento da injeção na perna de subida e decréscimo na câmara de vácuo, a constante cinética aumentou. Também se nota que à medida que a injeção na câmara de vácuo tende à zero, a constante cinética de reação aumenta, para essa combinação de bicos.

Para os bicos de 1,5; 2,2 e 2,8 mm's observou-se a tendência do aumento da constante cinética de reação, mas sem relevância quando se compara com a injeção apenas na perna de subida com vazão de 500l/min.

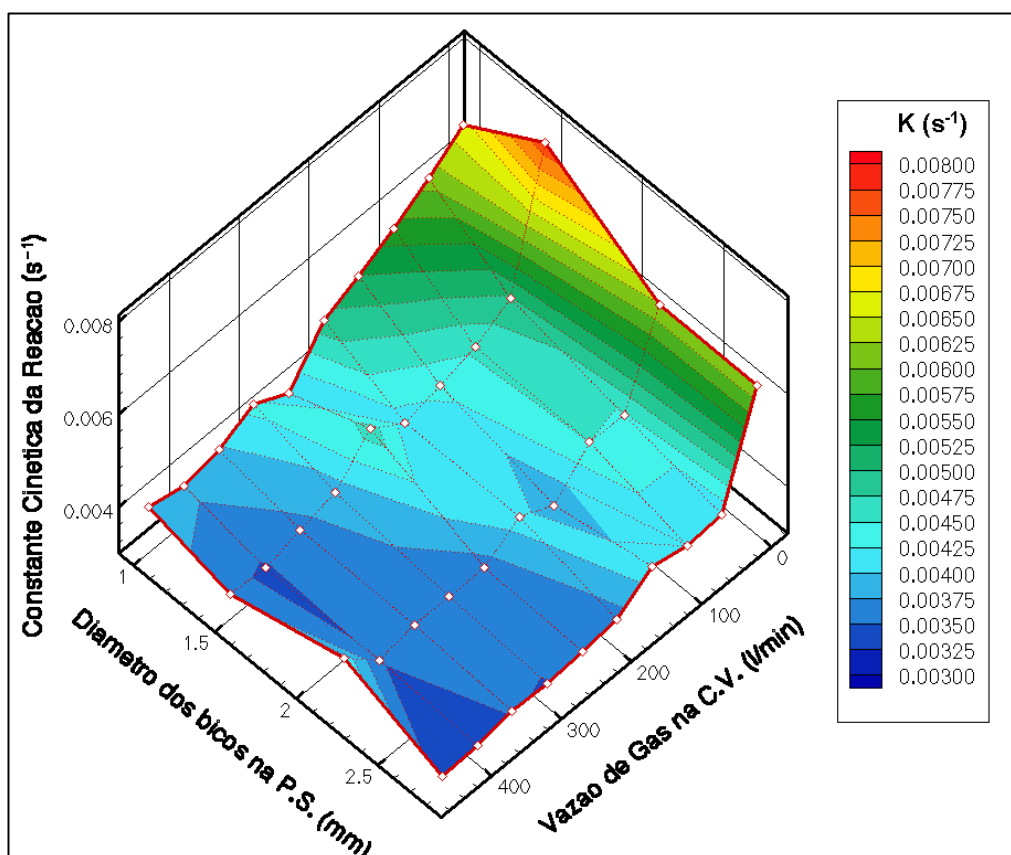


Figura 5.9 – Análise da constante cinética da reação com injeção de gás na câmara de vácuo com bicos de 2,8mm. CV significa câmara de vácuo e PS perna de subida.

5.2.5 – Análise dos resultados da cinética de descarburção com o efeito da injeção na câmara de vácuo

Dos resultados apresentados sobre o efeito da injeção de gás na câmara de vácuo quando se mantém a vazão de gás constante, nota-se que os melhores resultados obtidos do parâmetro cinético é no sentido dos menores bicos na perna de subida e menores vazões na câmara de vácuo. Outro efeito percebido foi que à medida que se aumentava o diâmetro dos bicos na câmara de vácuo, para um mesmo diâmetro dos bicos na perna de subida, a constante cinética tendeu a decrescer.

Observou-se também que quando se injeta um baixo volume de gás na câmara de vácuo, há uma tendência do aumento da constante cinética, como pode ser notado na maioria dos ensaios. Comparando o efeito da injeção na câmara de vácuo com a injeção de gás apenas na perna de subida, nota-se que para a maioria dos casos não foram obtidos resultados positivos. Sendo o único resultado positivo encontrado foi utilizando bicos de 1 milímetro na câmara de vácuo e 1 milímetro na perna de subida, no qual pôde-se notar que na maioria dos resultados as constantes cinéticas se mantiveram superiores à constante cinética com a injeção apenas na câmara de vácuo e vazão de 500l/min. Isto mostra que a injeção de gás na câmara de vácuo pode influenciar na cinética de descarburção de forma a trazer um melhor aproveitamento do gás durante o processo. Com esta configuração ocorreu o aumento da área de reação nos sítios de reação utilizando a área da superfície exposta ao vácuo, da área superficial das bolhas e dos (*splashes*).

5.3. Coeficiente Volumétrico de Transferência de Massa

A cinética de descarburção em muitos casos se comportou de maneira diferente em relação à taxa de circulação. Isso pode ser explicado devido à cinética de descarburção não depender apenas da taxa de circulação do processo, mas também do coeficiente volumétrico de transferência de massa, por este parâmetro quantificar a intensidade de ocorrência desta reação, por envolver, além da taxa de circulação, a área onde ocorre a reação e a concentração do elemento que se quer retirar do banho. O coeficiente volumétrico de transferência de massa foi determinado e foi calculado. Considerando, mistura perfeita na câmara de vácuo e na panela, a cinética de reação é controlada pela transferência de massa no líquido e a constante cinética pode ser representada pela

equação 5.1. Esta equação utilizada para o modelo físico é análoga à equação para o equipamento industrial, utilizada por Yamaguchi et al (1992).

$$K = \frac{1}{W_{\text{água}} \left(\frac{1}{Q} + \frac{1}{ak \cdot \rho_{\text{água}}} \right)} \quad (5.1)$$

onde:

K = constante cinética da reação (s^{-1});

$W_{\text{água}}$ = massa de água na panela (kg);

Q = taxa de circulação ($kg \cdot s^{-1}$);

a = área de reação (m^2);

k = coeficiente de transferência de massa ($m \cdot s^{-1}$)

$\rho_{\text{água}}$ = densidade da água ($kg \cdot m^{-3}$).

A área de reação possui uma grande influência na descarburização do equipamento. Com o aumento da área da pluma, a constante cinética em muitos casos aumenta, mesmo com a diminuição da taxa de circulação. A figura 5.37 mostra a tendência da variação da área da pluma com o coeficiente volumétrico de transferência de massa para todos os resultados.

Os resultados apresentados a seguir relacionam o coeficiente volumétrico de transferência de massa, a vazão de gás na câmara de vácuo e os diâmetros de bicos de injeção na perna de subida. Percebe-se que grande parte dos resultados entre 25 a 35% da porcentagem de área da pluma possuem coeficiente volumétrico de transferência de massa entre 0,0010 e 0,0015 m^3/s .

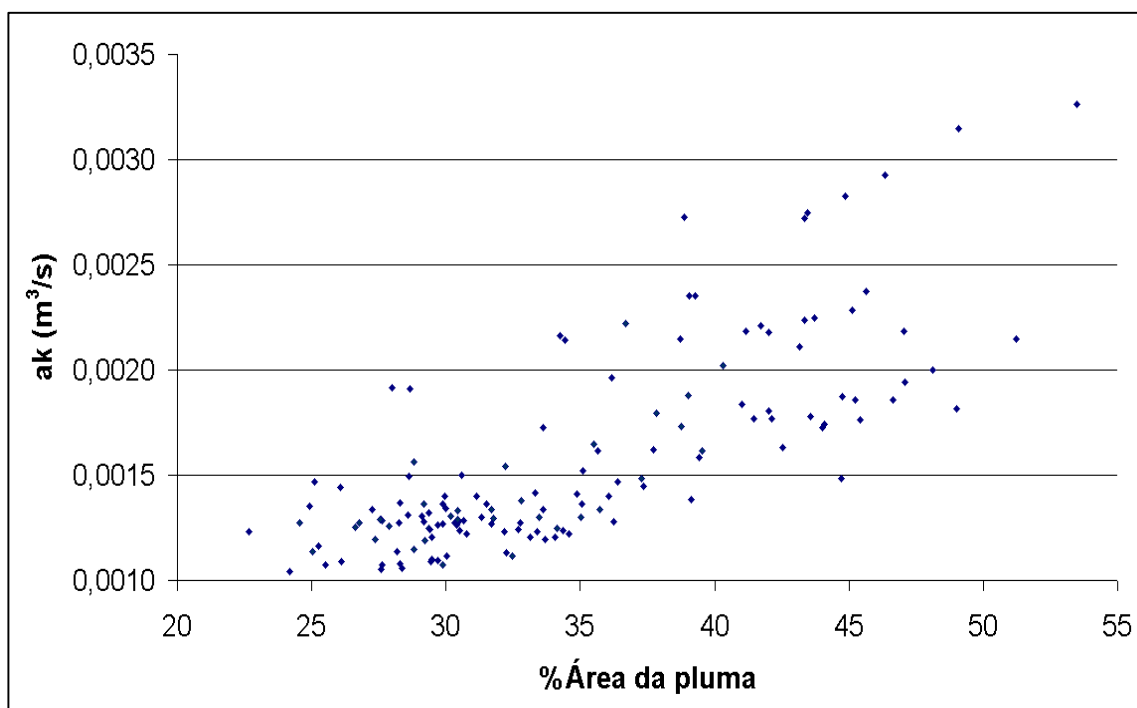


Figura 5.10 – Variação do coeficiente volumétrico com a porcentagem de área da pluma na câmara de vácuo.

5.3.1. Bicos de 1 milímetro de diâmetro na câmara de vácuo

A figura 5.11 apresenta o resultado da injeção na câmara de vácuo com bicos de 1 milímetro de diâmetro e injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm's; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo e o coeficiente volumétrico de transferência de massa. Considerando estas configurações, pode-se notar que os melhores resultados foram para bicos de 1 milímetro na perna de subida, em que para baixas vazões de gás na câmara de vácuo, se obteve altos valores do coeficiente volumétrico de transferência de massa. Em especial na vazão de 50l/min na câmara de vácuo, em que na figura 5.12 pode ser notado o melhor resultado do coeficiente volumétrico de transferência de massa. Analisando para as outras configurações com os bicos de 1,5; 2,2 e 2,8 mm's na perna de subida, nota-se que os resultados representados pela injeção de gás apenas na perna de subida obtiveram os melhores resultados.

Na tabela V.3 mostra as porcentagens de área da pluma na câmara de vácuo, as taxas de circulação, as constantes cinéticas e os coeficientes volumétricos de

transferência de massa para todas as vazões de gás na câmara de vácuo para ensaios com bicos com diâmetro de 1 milímetro na câmara de vácuo e 1 milímetro na perna de subida. Esta tabela também mostra os mesmos resultados para bicos de 1,5 milímetros na perna de subida. A tabela V.4, mostra os mesmos resultados que a tabela V.III, mas para bicos de 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida. O coeficiente volumétrico de transferência de massa é maior para os bicos de 1 milímetro na câmara de vácuo e 1 milímetro na perna de subida, como pode ser notado na figura 5.12. Os resultados de porcentagens de área de pluma na câmara de vácuo acompanham os coeficientes de volumétricos de transferência de massa para essa configuração de bicos.

O coeficiente volumétrico de transferência de massa exerce uma forte influência na constante cinética, e que também envolve a área de reação (área da pluma). Pode-se notar que em muitos casos, mesmo com a queda da taxa de circulação, a constante cinética da reação aumenta com o aumento da porcentagem de área da pluma. Isto é mostrado na tabela V.4, onde pode ser notado que com os bicos de 2,8 milímetros na perna de subida e 1 milímetro na câmara de vácuo, que mesmo para as vazões de 250l/min e 300l/min na câmara de vácuo, onde ocorrem taxas de circulação mais elevadas, os valores da constante cinética são baixos devido à diminuição da área de reação (área da superfície exposta ao vácuo, área da superfície da pluma e área de projeção do líquido).

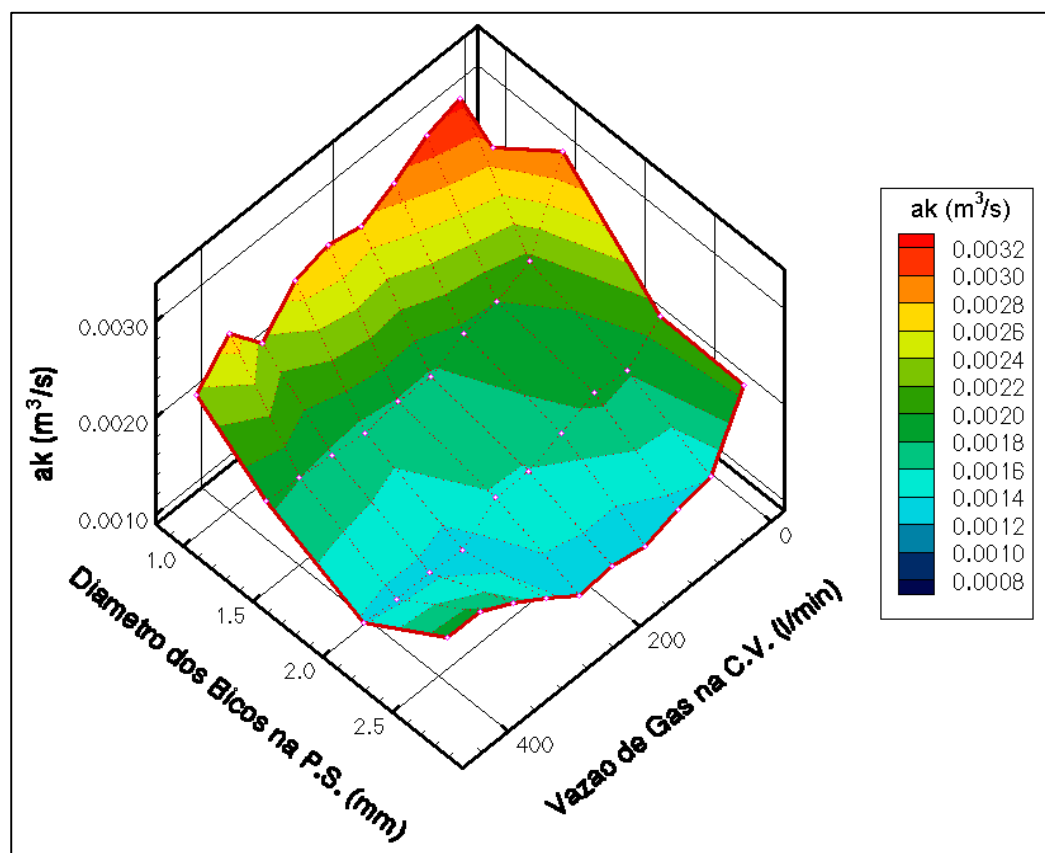


Figura 5.11 – Resultado da injeção na câmara de vácuo com bicos de 1 milímetro de diâmetro e injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo e o coeficiente volumétrico de transferência de massa.

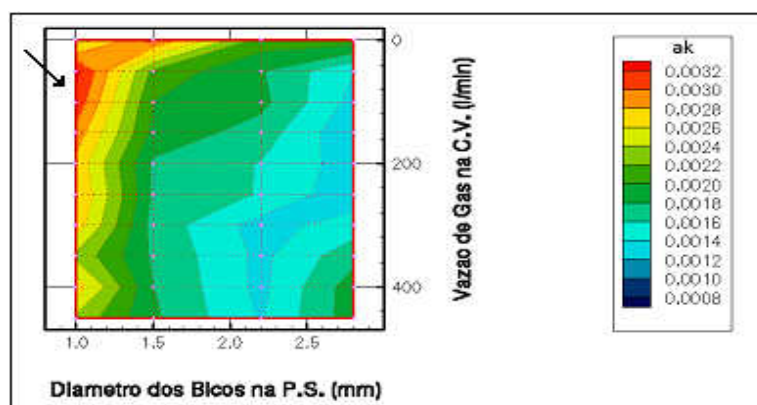


Figura 5.12 – Vista de planta da figura 5.11.

Tabela V.3. – Avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de massa para bicos de 1 milímetro na câmara de vácuo e bicos de 1 e 1,5 milímetros na perna de subida

\varnothing^{PS} (mm)	Vazão na C.V. (l/min)	Q (Kg/s)	K (s ⁻¹)	ak (m ³ /s)	% Área da pluma
1	450	4,65	0,00613	0,002352	39,06
	400	4,81	0,00682	0,002726	38,87
	350	5,16	0,00633	0,002351	39,29
	300	5,22	0,00702	0,002723	43,34
	250	5,54	0,00734	0,002826	44,86
	200	5,28	0,00708	0,002746	43,47
	150	5,28	0,00738	0,002927	46,33
	100	5,27	0,00773	0,003147	49,07
	50	5,33	0,00794	0,003264	53,48
1,5	450	4,99	0,00526	0,001836	41,00
	400	5,36	0,00530	0,001805	42,01
	350	5,58	0,00526	0,001767	42,13
	300	5,68	0,00519	0,001724	44,00
	250	5,82	0,00534	0,001778	43,58
	200	6,00	0,00535	0,001764	45,40
	150	5,87	0,00573	0,001944	47,10
	100	6,10	0,00590	0,001999	48,10
	50	6,02	0,00620	0,002145	51,23

Sendo: \varnothing^{PS} = diâmetro dos bicos na perna de subida; Vazão na C.V. = vazão de gás na câmara de vácuo; Q = taxa de circulação e ak = coeficiente volumétrico de transferência de massa.

Tabela V.4. – Avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de massa para bicos de 1 milímetro na câmara de vácuo e bicos de 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida.

\varnothing^{PS} (mm)	Vazão na C.V. (l/min)	Q (Kg/s)	K (s^{-1})	ak (m^3/s)	% Área da pluma
2,2	450	4,66	0,00417	0,001379	41,12
	400	5,46	0,00423	0,001346	41,42
	350	5,16	0,00420	0,00135	40,56
	300	5,85	0,00421	0,001314	39,39
	250	5,95	0,00491	0,001584	39,43
	200	6,08	0,00494	0,001589	44,66
	150	6,30	0,00528	0,001711	47,20
	100	6,17	0,00560	0,001859	46,62
	50	6,41	0,00555	0,001818	49,01
2,8	450	4,56	0,00529	0,001913	28,01
	400	5,15	0,00546	0,001908	28,67
	350	5,39	0,00513	0,001729	33,62
	300	5,80	0,00467	0,001500	30,58
	250	6,11	0,00410	0,001261	30,40
	200	6,30	0,00422	0,001299	31,32
	150	6,59	0,00417	0,001231	32,17
	100	6,58	0,00435	0,001335	33,62
	50	6,46	0,00454	0,001409	34,89

Sendo: \varnothing^{PS} = diâmetro dos bicos na perna de subida; Vazão na C.V. = vazão de gás na câmara de vácuo; Q = taxa de circulação e ak = coeficiente volumétrico de transferência de massa.

5.3.2. Bicos de 1,5 milímetro na câmara de vácuo

A figura 5.13 apresenta o resultado da injeção na câmara de vácuo com bicos de 1,5 milímetro de diâmetro e injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm's; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo e o coeficiente volumétrico de transferência de massa. Como era de se esperar, os melhores resultados foram para bicos de 1 milímetro na perna de subida quando se considera a injeção de gás na câmara de vácuo. Para baixas vazões de gás na câmara de vácuo, se obteve altos valores do coeficiente volumétrico de transferência de massa. O melhor resultado foi para a injeção apenas na perna de subida para os bicos de 1,5mm. Nota-se também que para a injeção de gás na câmara de vácuo para todos os diâmetros de bicos na perna de subida, os coeficientes volumétricos de transferência de massa se mantiveram entre 0,0012 e 0,0014m³/s, para altas vazões de gás na câmara de vácuo.

Na tabela V.5 mostra as porcentagens de área de pluma, as taxas de circulação e os coeficientes de transferência de massa para todas as vazões de gás na câmara de vácuo para ensaios com bicos com diâmetro de 1,5 milímetro na câmara de vácuo e 1 milímetro na perna de subida. Também, mostra os mesmos resultados para bicos de 1,5 milímetro na perna de subida. Na tabela V.6, mostra os resultados com bicos de injeção de 1,5 milímetro na câmara de vácuo, e para bicos de 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida.

Em todos os casos mesmo com a queda da taxa de circulação a constante cinética de reação aumenta com o aumento da porcentagem de área. Isto é mostrado para todas configurações com injeção na câmara de vácuo com bicos de diâmetro de 1,5 milímetro.

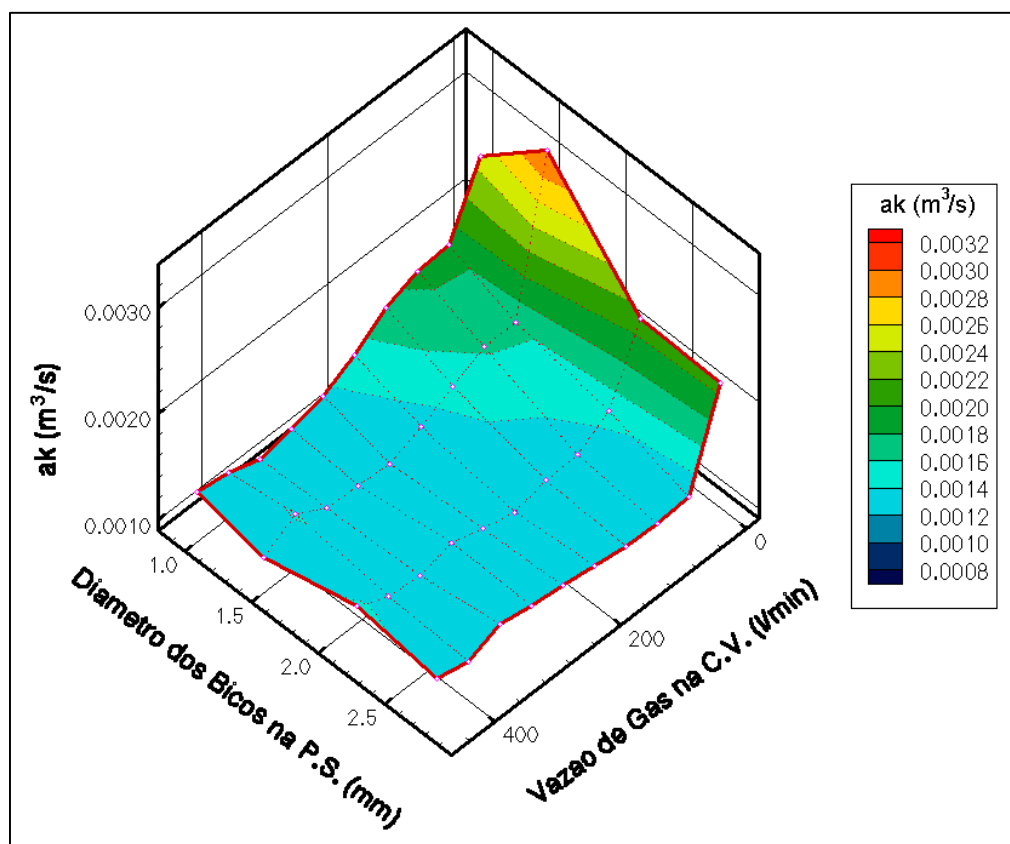


Figura 5.13 – Resultado da injeção na câmara de vácuo com bicos de 1,5 milímetro de diâmetro e injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo e o coeficiente volumétrico de transferência de massa.

Tabela V.5. – Avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de massa para bicos de 1,5 milímetro na câmara de vácuo e bicos de 1 e 1,5 milímetros na perna de subida

\varnothing^{PS} (mm)	Vazão na C.V. (l/min)	Q (Kg/s)	K (s^{-1})	ak (m^3/s)	% Área da pluma
1	450	4,36	0,00409	0,001369	28,30
	400	4,79	0,00407	0,001324	29,36
	350	4,82	0,00382	0,001219	30,75
	300	5,15	0,00402	0,001279	30,48
	250	5,34	0,00426	0,001365	31,51
	200	5,48	0,00467	0,001522	35,08
	150	5,52	0,00520	0,001744	44,07
	100	5,42	0,00543	0,001858	45,23
	50	5,34	0,00544	0,001873	44,74
1,5	450	4,21	0,00375	0,001236	30,50
	400	5,05	0,00433	0,001414	33,32
	350	5,16	0,00392	0,001241	32,68
	300	5,40	0,00393	0,001229	33,40
	250	5,65	0,00390	0,001207	35,22
	200	5,78	0,00423	0,001327	39,77
	150	5,91	0,00465	0,001482	44,73
	100	5,61	0,00494	0,001622	46,66
	50	5,70	0,00497	0,001631	42,55

Sendo: \varnothing^{PS} = diâmetro dos bicos na perna de subida; Vazão na C.V. = vazão de gás na câmara de vácuo; Q = taxa de circulação e ak = coeficiente volumétrico de transferência de massa.

Tabela V.6. – Avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de massa para bicos de 1,5 milímetro na câmara de vácuo e bicos de 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida.

\varnothing^{PS} (mm)	Vazão na C.V. (l/min)	Q (Kg/s)	K (s ⁻¹)	ak (m ³ /s)	% Área da pluma
2,2	450	3,93	0,00414	0,001444	26,06
	400	4,87	0,00405	0,001309	28,57
	350	5,56	0,00408	0,001280	29,16
	300	5,69	0,00431	0,001362	29,87
	250	6,01	0,00410	0,001267	29,88
	200	6,16	0,00393	0,001196	33,69
	150	6,26	0,00413	0,001267	37,26
	100	6,08	0,00415	0,001280	36,24
	50	6,32	0,00467	0,001468	36,38
2,8	450	4,31	0,00401	0,001339	27,24
	400	5,08	0,00400	0,001275	28,24
	350	5,63	0,00439	0,001399	29,95
	300	5,82	0,00428	0,001343	30,00
	250	5,92	0,00419	0,001304	29,10
	200	6,36	0,00415	0,001268	31,69
	150	6,42	0,00403	0,001223	34,56
	100	6,44	0,00399	0,001207	33,15
	50	6,42	0,00406	0,001234	34,35

Sendo: \varnothing^{PS} = diâmetro dos bicos na perna de subida; Vazão na C.V. = vazão de gás na câmara de vácuo; Q = taxa de circulação e ak = coeficiente volumétrico de transferência de massa.

5.3.3. Bicos de 2,2 milímetros de diâmetro na câmara de vácuo

A figura 5.14 apresenta o resultado da injeção na câmara de vácuo com bicos de 2,2 milímetros de diâmetro e injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm's em relação à vazão de gás na câmara de vácuo e o coeficiente volumétrico de transferência de massa. Como se pode notar a injeção de gás apenas na perna de subida foi que obteve o melhor resultado. O pior resultado dentre todos foi para o bico de 2,2mm

e vazão de 250l/min na câmara de vácuo, acompanhado de uma menor porcentagem de área de pluma (tabela V.8).

Nota-se também que para as altas vazões de gás na câmara de vácuo e para bicos de diâmetros maiores na perna de subida, o coeficiente volumétrico de transferência de massa obteve seus resultados menos relevantes.

Na tabela V.7 e V.8 pode-se se notar que o coeficiente volumétrico de transferência de massa decresce no sentido dos menores diâmetros de bicos e menores vazões na câmara de vácuo para o maiores diâmetros de bicos e maiores vazões na câmara de vácuo.

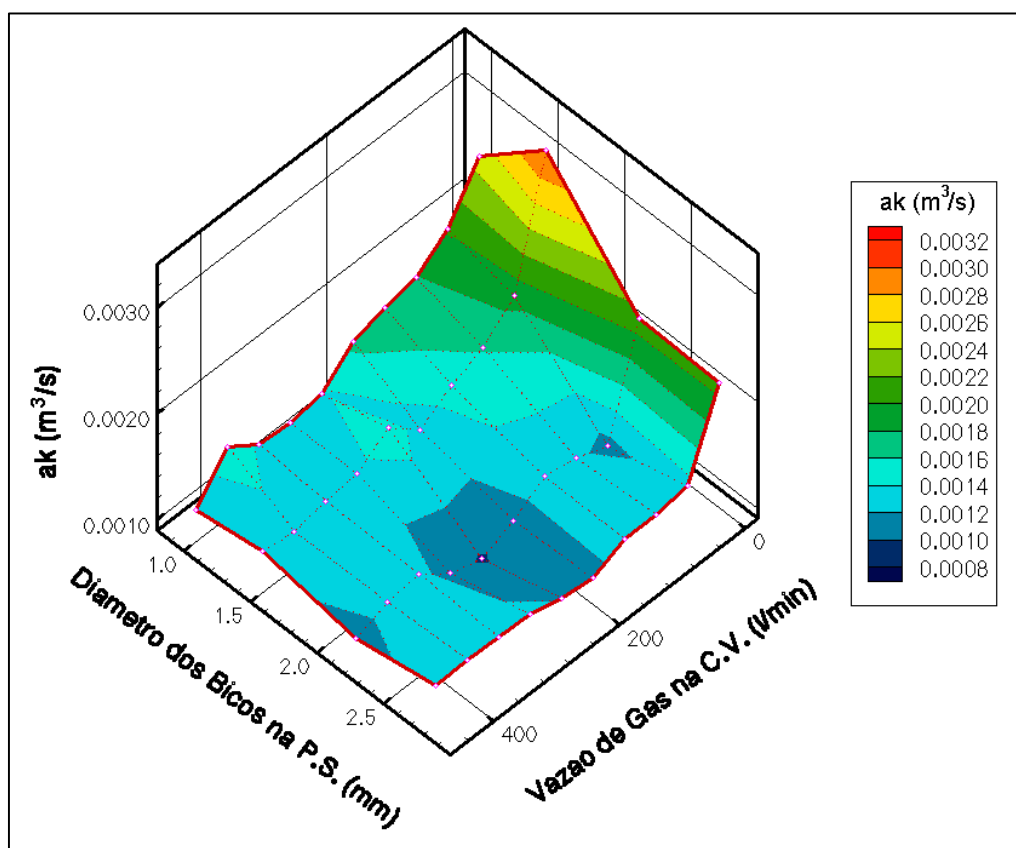


Figura 5.14 – Resultado da injeção na câmara de vácuo com bicos de 2,2 milímetro de diâmetro e injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo e o coeficiente volumétrico de transferência de massa.

Tabela V.7. – Avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de massa para bicos de 2,2 milímetro na câmara de vácuo e bicos de 1 e 1,5 milímetros na perna de subida

\varnothing^{PS} (mm)	Vazão na C.V. (l/min)	Q (Kg/s)	K (s^{-1})	ak (m^3/s)	% Área da pluma
1	450	4,33	0,00368	0,001197	27,37
	400	4,82	0,00463	0,001565	28,80
	350	5,18	0,00423	0,001362	29,16
	300	5,21	0,00416	0,001333	30,44
	250	5,31	0,00429	0,001378	32,81
	200	5,36	0,00494	0,001647	35,50
	150	5,36	0,00514	0,001734	38,74
	100	5,21	0,00523	0,001794	37,85
	50	5,35	0,00576	0,002024	40,30
1,5	450	4,12	0,00384	0,001283	27,61
	400	4,66	0,00386	0,001248	29,37
	350	5,25	0,00410	0,001307	30,16
	300	5,57	0,00423	0,001337	31,70
	250	5,67	0,00475	0,00154	32,21
	200	5,90	0,00417	0,001298	35,01
	150	5,81	0,00464	0,001484	37,28
	100	5,78	0,00496	0,001618	39,54
	50	5,77	0,00556	0,001878	39,00

Sendo: \varnothing^{PS} = diâmetro dos bicos na perna de subida; Vazão na C.V. = vazão de gás na câmara de vácuo; Q = taxa de circulação e ak = coeficiente volumétrico de transferência de massa.

Tabela V.8. – Avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de massa para bicos de 2,2 milímetro na câmara de vácuo e bicos de 2,2, e 2,8 milímetros na perna de subida.

\varnothing^{PS} (mm)	Vazão na C.V. (l/min)	Q (Kg/s)	K (s^{-1})	ak (m^3/s)	% Área da pluma
2,2	450	4,46	0,00355	0,001135	25,05
	400	5,35	0,00398	0,001253	26,63
	350	5,68	0,00412	0,001291	27,59
	300	6,29	0,00359	0,001071	29,87
	250	6,45	0,00334	0,00098	28,84
	200	6,42	0,00373	0,001115	32,48
	150	6,86	0,00429	0,001301	33,46
	100	7,02	0,00415	0,001247	34,13
	50	6,71	0,00381	0,001135	34,76
2,8	450	3,88	0,00376	0,001273	24,54
	400	4,96	0,00401	0,001288	27,55
	350	5,63	0,00407	0,001272	26,76
	300	5,92	0,00407	0,001259	27,88
	250	6,14	0,00390	0,001188	29,23
	200	6,26	0,00380	0,001146	28,79
	150	6,33	0,00421	0,001292	30,45
	100	6,36	0,00422	0,001294	31,76
	50	6,42	0,00433	0,001335	35,72

Sendo: \varnothing^{PS} = diâmetro dos bicos na perna de subida; Vazão na C.V. = vazão de gás na câmara de vácuo; Q = taxa de circulação e ak = coeficiente volumétrico de transferência de massa.

5.3.4. Bicos de 2,8 milímetros na câmara de vácuo

A figura 5.15 apresenta o resultado da injeção na câmara de vácuo com bicos de 2,8 milímetro de diâmetro e injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm's; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo e o coeficiente volumétrico de transferência de massa. Como se notou, os resultados mais expressivos foram para a injeção de gás apenas na perna de subida. As tabelas V.9 e V.10 apresentam estes resultados.

Nota-se que para altas vazões de gás na câmara de vácuo e bicos de diâmetros maiores na perna de subida os coeficientes volumétricos de transferência de massa se mantiveram praticamente, com seus resultados variando entre 0,0010 e 0,0012m³/s.

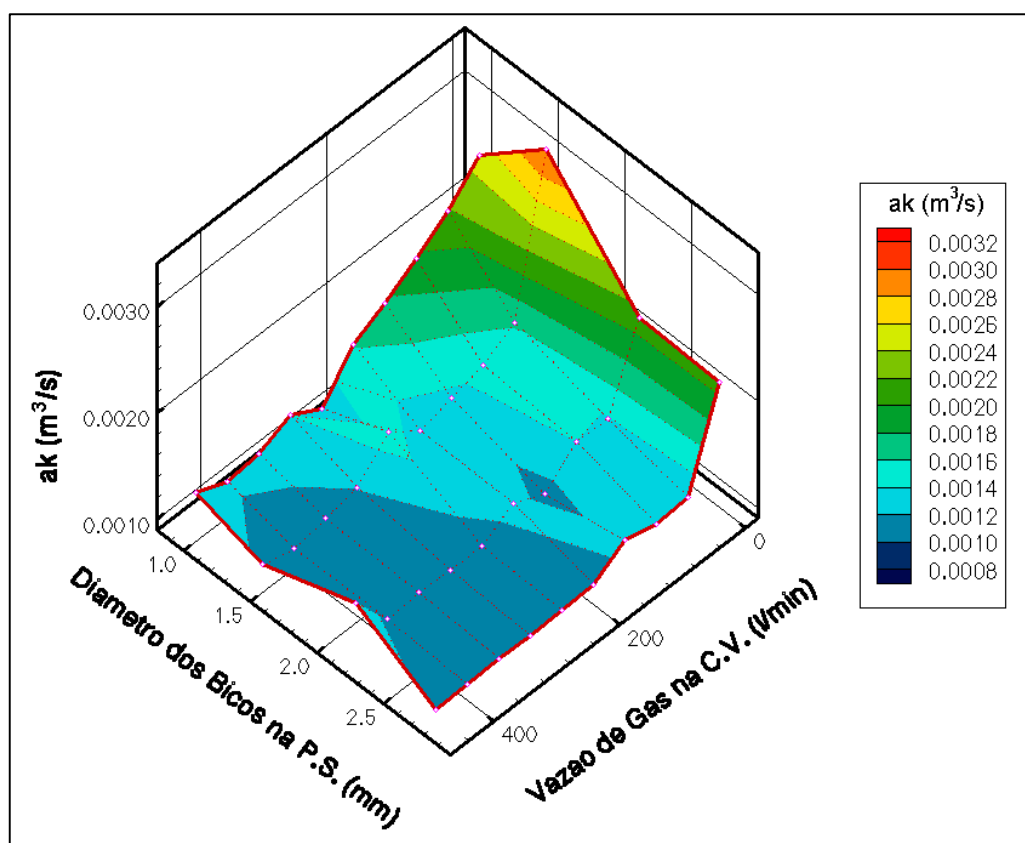


Figura 5.15 – Resultado da injeção na câmara de vácuo com bicos de 2,8 milímetro de diâmetro e injeção na perna de subida para os bicos de 1; 1,5; 2,2 e 2,8mm; em relação à vazão de gás na câmara de vácuo e o coeficiente volumétrico de transferência de massa.

Tabela V.9. – Avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de massa para bicos de 2,8 milímetros na câmara de vácuo e bicos de 1 e 1,5 milímetros na perna de subida.

\varnothing^{PS} (mm)	Vazão na C.V. (l/min)	Q (Kg/s)	K (s ⁻¹)	ak (m ³ /s)	% Área da pluma
1	450	4,04	0,00397	0,001351	24,93
	400	4,61	0,00382	0,001234	22,68
	350	5,07	0,00397	0,001265	29,68
	300	5,18	0,00433	0,001402	31,13
	250	5,42	0,00396	0,001241	29,38
	200	5,58	0,00491	0,001615	35,64
	150	5,49	0,00524	0,001768	41,45
	100	5,43	0,00566	0,001965	36,15
	50	5,48	0,00613	0,002186	47,06
1,5	450	4,06	0,00354	0,001161	25,27
	400	4,95	0,00348	0,00108	28,30
	350	5,38	0,00369	0,001138	28,16
	300	5,49	0,00387	0,001205	29,48
	250	5,58	0,00463	0,001497	28,62
	200	5,91	0,00414	0,001284	30,66
	150	5,81	0,00433	0,001363	35,05
	100	5,82	0,00454	0,001446	37,37
	50	5,81	0,00497	0,001622	37,72

Sendo: \varnothing^{PS} = diâmetro dos bicos na perna de subida; Vazão na C.V. = vazão de gás na câmara de vácuo; Q = taxa de circulação e ak = coeficiente volumétrico de transferência de massa.

Tabela V.10. – Avaliação do coeficiente volumétrico de transferência de massa para bicos de 2,8 milímetro na câmara de vácuo e bicos de 2,2 e 2,8 milímetros na perna de subida

\varnothing^{PS} (mm)	Vazão na C.V. (l/min)	Q (Kg/s)	K (s ⁻¹)	ak (m ³ /s)	% Área da pluma
2,2	450	3,83	0,00416	0,001468	25,09
	400	4,97	0,00351	0,001091	26,12
	350	5,66	0,00365	0,001114	30,02
	300	5,93	0,00364	0,001099	29,47
	250	6,13	0,00365	0,001096	29,70
	200	6,03	0,00413	0,001275	30,33
	150	6,27	0,00376	0,001131	32,24
	100	6,33	0,00450	0,001401	36,05
	50	6,41	0,00447	0,001385	39,14
2,8	450	4,72	0,00334	0,00104	24,17
	400	4,89	0,00340	0,001054	27,59
	350	5,38	0,00351	0,001074	25,50
	300	5,56	0,00349	0,00106	28,38
	250	6,02	0,00357	0,001074	27,62
	200	6,21	0,00363	0,001089	29,44
	150	6,43	0,00417	0,001273	32,77
	100	6,66	0,00400	0,001203	34,07
	50	6,41	0,00404	0,001229	35,02

Sendo: \varnothing^{PS} = diâmetro dos bicos na perna de subida; Vazão na C.V. = vazão de gás na câmara de vácuo; Q = taxa de circulação e ak = coeficiente volumétrico de transferência de massa.

5.3.5. Análise dos efeitos do coeficiente volumétrico de transferência de massa e a taxa de circulação na cinética de descarburização

Como se pode notar os gráficos plotados das constantes cinéticas da reação e dos coeficientes volumétricos de transferência de massa possuem as mesmas tendências e são muito semelhantes quando comparados. Também pode ser notado que os resultados de ambos parâmetros variam um de acordo com o outro nas tabelas de V.3 a V.10. Isto devido coeficiente volumétrico de transferência de massa ser determinante na reação de descarburização no desgaseificador RH.

O resultado positivo obtido para injeção de gás na câmara de vácuo foi com a injeção tanto na câmara de vácuo quanto na perna de subida com bicos de 1 milímetro, com uma constante cinética de $0,00794s^{-1}$, taxa de circulação de 5,33kg/s e porcentagem de área de pluma de 53,48%. Para o a injeção de gás apenas na perna de subida, a constante cinética tem o valor de $0,00666s^{-1}$, taxa de circulação de 5,40kg/s e porcentagem de área de pluma de 49,48%. Com a comparação destes resultados percebe-se que a área da pluma onde ocorre a reação exerce uma forte influência na constante cinética, mesmo que a taxa de circulação seja inferior.

Os melhores resultados obtidos com a configuração de bicos de 2,2mm na perna de subida e 2,2mm na câmara de vácuo, na taxa de circulação está em contraste como um dos piores resultados obtidos na cinética de descarburização e coeficiente volumétrico de transferência de massa. Isto mostra que a taxa de circulação possui uma influência limitada, sendo o coeficiente volumétrico de transferência de massa o principal responsável pela descarburização do aço no desgaseificador RH.

Os outros resultados das configurações não obtiveram resultados positivos com a injeção na câmara de vácuo em relação à injeção apenas na perna de subida. Entretanto, determinando a configuração adequada, pode-se afirmar que injeção de gás na câmara de vácuo pode influenciar na cinética de descarburização e na taxa de circulação, de forma a trazer um melhor aproveitamento do gás durante o processo.

Além dos resultados já analisados do efeito da injeção de gás na perna de subida na constante cinética e no coeficiente volumétrico de transferência de massa, nota-se que para altas vazões de gás na câmara de vácuo, a constante cinética se manteve menor que a injeção apenas na perna de subida. Este efeito pode ser explicado devido à interação entre as bolhas das diferentes posições de injeção. Com isso o gás injetado na câmara de vácuo funciona como um inibidor ao gás que ascende da região inferior,

diminuindo a transferência de energia da ascensão do gás injetado na perna de subida para o líquido. Devido a este efeito há uma menor agitação no interior da câmara de vácuo, decrescendo a área da superfície exposta ao vácuo e também a quantidade de projeções do líquido (*splashes*).

6. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvido um estudo para avaliar as taxas de circulação e de descarburização em um modelo físico similar a um desgaseificador RH usado na USIMINAS. Este modelo foi construído em acrílico, em escala 1:5 em relação ao equipamento industrial, analisando o efeito da injeção de gás na base da câmara de vácuo, injeção de gás na perna de subida e do diâmetro dos bicos de injeção. Dos resultados encontrados pode-se tirar as seguintes conclusões:

- os resultados de taxa de circulação aumentaram à medida que se aumentou a vazão de gás na perna de subida e tenderam a se manter constantes quando se injetaram altas vazões de gás na perna de subida. Em alguns casos foi observado que este efeito culminou com um pico na taxa de circulação e após uma ligeira queda se manteve constante. Este efeito pode ser explicado por um maior arraste do líquido pelo gás injetado no interior da perna de subida. Isto ocorre, pois a perna de subida passa a ser ocupada por um grande volume de gás e a quantidade de líquido arrastado tende a diminuir;
- os resultados das taxas de circulação para os diferentes ensaios, em relação à injeção e a não injeção na câmara de vácuo, estão muito próximos e uma análise baseada em teste de hipótese, não permite afirmar que os resultados de comparação entre as taxas de circulação dos dois diferentes tipos de ensaios sejam estatisticamente diferentes, considerando a dispersão dos resultados;
- as taxas de circulação com injeção de gás na câmara de vácuo se elevaram com o aumento dos diâmetros dos bicos de injeção de gás na perna de subida. Os diâmetros de bicos na câmara de vácuo não demonstraram efeito significativo sobre a taxa de circulação;
- a interação entre as bolhas das diferentes posições de injeção influencia na taxa de circulação e na cinética descarburização. O gás injetado na câmara de vácuo funciona como um inibidor ao gás que ascende da região inferior, diminuindo a transferência de energia da ascensão do gás injetado na perna de subida para o líquido, influenciando na queda da taxa de circulação. Devido a este efeito a superfície onde ocorre a reação diminui, pois há uma menor agitação no interior da câmara de vácuo, decrescendo também a quantidade de “splashes”, influenciando na cinética de descarburização;

- o único efeito positivo em relação à cinética da reação foi obtido utilizando bicos de diâmetro de 1 milímetro na câmara de vácuo e 1 milímetro na perna de subida, para os quais as constantes cinéticas se mantiveram superiores à constante cinética da injeção de 500l/min apenas na perna de subida. Esta tendência também foi observada nos coeficientes volumétricos de transferência de massa. Apesar desta melhora com este resultado, sabe-se da limitação do uso deste diâmetro de bicos quando transposto para a indústria, devido a alguns efeitos indesejáveis, tal como o entupimento dos bicos;
- os pontos ótimos para a taxa de circulação e taxa de descarburização foram encontrados para as diferentes configurações de bicos de injeção. Os resultados demonstraram que a taxa de descarburização depende do coeficiente volumétrico de transferência de massa, mostrando que diferentemente dos resultados apresentados por vários autores até hoje, a taxa de circulação não é a única responsável pela intensidade da reação de descarburização;

O efeito da injeção de gás na câmara de vácuo do modelo físico demonstrou que se pode encontrar melhora na cinética de descarburização a partir das configurações adequadas. Podendo ser uma ferramenta adicional no aumento da produtividade do equipamento industrial, de forma a trazer um melhor aproveitamento do gás durante o processo.

7. TRABALHOS FUTUROS

Para um aperfeiçoamento dos métodos utilizados para melhora na produtividade do desgaseificador RH, os seguintes trabalhos são sugeridos:

- injeção na câmara de vácuo, utilizando configurações dos bicos na câmara de vácuo no sentido de melhora na taxa de circulação, ou seja, facilitar o escoamento do fluido na câmara de vácuo, tal como, obstrução dos bicos de injeção na câmara de vácuo próximos à perna de descida e injeção de gás na região superior à perna de descida;
- injeção na câmara de vácuo utilizando outras configurações, tal como, pernas com diâmetros maiores, aumento do número das pernas de injeção e vazões menores, verificando-se o efeito na taxa de descarburização e cinética de descarburização;
- modelagem matemática estudando o efeito da injeção de gás na câmara de vácuo para estudar a dinâmica de escoamento dos fluidos;
- estudar o comportamento do gás na câmara de vácuo e na perna de subida, utilizando a modelagem física e matemática, em relação aos diferentes níveis de injeção.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahrenhold, F., Knopp, I., Liebig, H., Shutz, C-H., Tembergen, D., Experience with the Second RH degasser at the Beeckerwerth Steel of TKS , paper presented at ABM – Brazilian Metals Society Congress, May 19-21, Belo Horizonte, Brasil.

Ajmani, S.,K., Dash, S., K., Chandra, S. & Bhanu, C., Mixing Evaluation in the RH process using Mathematical modeling, ISIJ International, Vol. 44 (2004), N°1, pp. 82-90.

Almeida, A. T. P. Estudo da Cinética de Descarburização no Modelo Físico do Desgaseificador à Vácuo RH, Trabalho Final de Curso, UFMG, Belo Horizonte, 2005.

Almeida, A.T.P., Alvarenga, J.A., Belarmino, T.J.P., Cardoso, A.C.P., Nascimento, A.A., Tavares, R. P., et al., Physical Modeling of Vacuum Decarburization in an RH Degasser, AISTech 2006 Proceedings, Vol. 1, 2006, 761-770.

B. Kleimt, B., Kohle, S., Johan, K. P, Jungreithmeir, A., Molinero, J., Dynamic Process Model For Denitrogenation and Dehydrogenation by Vacuum Degassing, 1st International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking, 7-8 junho, 1999, Lulea, Suécia.

Carvalho, J. L. R., Camilo, R. D., Figueira, R. M., Campos, V. C., Dados termodinâmicos para metalurgistas, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Fevereiro, 1977.

Castro, L.F.A., Sampaio, S.S., Tavares, R.P., Termodinâmica Metalúrgica, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, Julho, 1996.

Ehara, T., Nakai, K., Fujioka, M., The KTB Method in the World Industry: Recent Progress in Kawasaki Steel's Advanced Top Oxygen Blowing Method for the Vacuum Degasser, Kawasaki Steel Technical Reports, n°36, Julho, 1997.

Endoh, K., Nakagawa, J., Takahama, H., Inaba, A., Takamoto, H., Obana, Y., Kaneko, T., Yamamoto, T., Development of Multifunctional Secondary Refining Process (RH-Injection Process), Nippon Steel Technical Report, n°45, April (1990), p. 23-29.

Ermolaeva, E.I., Kopylov, A.F., Khrebin, V.N., Sukhanov Y. F. and Dezhemesov, A.A., Characteristics of Decarburization of Metal during Continuous Vacuum Degassing Steel in translation, vol. 5, 1995, p. 19-21.

Filho, G. A. V. e Tavares, R. P., Modelagem matemática e física do desgaseificador RH da Companhia Siderúrgica Tubarão-CST, dissertação de mestrado, Junho, 2000.

Guo, D. & Irons, G.A., Modeling of Gas-Liquid Reactions in Ladle Metallurgy: Part I. Physical Modeling – Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 31, p 1447-1455, 2000.

Guo, D. & Irons, G.A., Modeling of Gas-Liquid Reactions in Ladle Metallurgy: Part II. Numerical Simulation – Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 31, 2000, p.1457 – 1464.

Hahn, F.J., RH Vacuum Technology (preliminary), 1997 Apud Tadeu, A., Trabalho de Curso.

Hanna, R.K., Jones, T., Blake, R.I., Millman M.S., Water modeling to aid improvement of degasser performance for production of ultra-low carbon interstitial free steel, Iron & Steelmaking, Vol.21, N°1, p. 111-119, 1992.

Inoue, S., Furuno, Y., Usui, T. & Miyahara, S., Acceleration of Decarburization in RH Vacuum Degassing Process, ISIJ International, Vol. 32, N°1, pp. 120-125, 1992.

Kamata, C., Matsumura, H., Miyasaka, H., Hayashi, S., Ito, K., Cold Model Experiments on the Circulation Flow in RH Reactor using a Laser Doppler Velocimeter, Steelmaking Conference Proceedings, 1998, p. 609-616.

Kato, Y., Nakato, H., Fuji, T., Ohmiya, S. and Takatori, S., Fluid Flow in a Ladle and Its Effect on Decarburization Rate in RH Degasser, ISIJ International, Vol. 33 (1993), N°10, p. 1088-1094.

Kishimoto, Y., Yamaguchi, K., Sakuraya, T. and Fujii, T., Decarburization Reaction in Ultra-Low Carbon Iron Melt under Reduced Pressure, ISIJ International, vol. 33 (1993), n°3, p. 391-399.

Kitamura, S-Y, Aoki, H., Miyamoto, K-I, Furuta, H, Yamashita, K and Yonezawa, K., Development of a Novel Degassing Process Consisting with Single Large Immersion Snorkel and a Bottom Bubbling Ladle, ISIJ International, vol. 40 (2000), n°5, p 455-459.

Kitamura, T., Miyamoto, K., TSUJINO, R., MIZOGUCHI, S. and KATO, K., Mathematical Model for Nitrogen Desorption and Decarburization Reaction in Vacuum Degasser, ISIJ International, vol. 36, 1996, p. 395 – 401.

Kleimt, B., Kohle, S., Johan, K. P. A. Jungreithmeir, Joseba Molinero. Dynamic Process Model For Denitrogenation and Dehydrogenation by Vacuum Degassing. 1^a International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking, 7-8 junho 1999, Lulea, Suécia.

Kondo, H., Kameyama, K., Nishikawa, H., Hamagami, K., Fujii, T., Comprehensive Refining Process by the Q-BOP-RH Route for Producing Ultra-Low-Carbon Steel, Iron & Steelmaker, vol.16, n°10, p. 111-119, outubro, 1989.

Kruschke, E., Opitz, A, Tembergen, D. e Teworte, R , Modernization of EKO Stahl's Secondary Metallurgy, Stahl Und Eisen 122 (2002), n°9, p. 31-38.

Kurokawa, N: Proc. of 5th Conference for License of RH Process, Thyssen Stahl Aktiengesellschaft, Vienna, Duisburg, (1987), 61; Apud: Park, Y-G., Yi K-W., Ahn S-B., The Numerical Calculation of Circulation Flow Rate in the Degassing Rheinstahl-Heraeus Process, ISIJ International, Vol.40, N°8, p . 749-755, 2000.

Kuwabara, T., Umezawa, K., Mori, K. e Watanabe, H. Investigation of Decarburization Behavior in RH-Reactor and its Operation Improvement, Transactions ISIJ, vol. 28, p 305-314, 1988.

Lee, S.-Y., Huang, C.-H., Manufacturing technology of extra low carbon bloom for cold heading quality, SEAIQ Quaterly, Janeiro 1995, p. 41 – 46.

Li, B., and Fumitaka Tsukihashi, F., Effect of rotating magnetic field on two-phase flow in RH vacuum degassing vessel, ISIJ International, vol. 45 (2005), n°7, p 972-978.

Li, B., and Fumitaka Tsukihashi, F., Modeling of circulating flow in RH degassing vessel water model designed for two- and multi-legs operations, ISIJ International, vol. 40 (2000), n°12, p 1203-1209.

Marsh, R. and Donahue, F., Continuous Improvement at the Great Lakes Division's N° 1 RH Degasser, National Steel Corporation, paper presented at the ISS 77th Steelmaking Conference, Julho (1994), p. 15 – 20.

Martins, E. , Silva, C., Estudo da Otimização de Um Desgaseificador RH por Meio de Modelagem Física, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Março, 2003.

Matsuno, H., Kikuchi, Y., Komatsu, M., Arai, M., Watanabe, K. and Nakashima, H., Development of a New Technique for RH Degassers, paper presented at the ISS 76th Steelmaking Conference, Julho (1993), p. 35 – 38.

Miki, Y., Thomas, B.G., Denissov, A., Shimada, Y., Model of inclusions removal during RH degassing of steel, Iron and Steelmaker, vol. 24, n° 8, Iron and Steel Society, Warrendale, PA, 1997, p. 31-38.

Nakanishi, K., Szekely & Chang, C. W., Experimental and theoretical investigations of mixing phenomena in the RH-vacuum process, Ironmaking & Stellmaking, N°2, p.115-124, 1975.

Obata, F., Waka, K., Uehara, K., Ito, K. and Kawata, Y.:CAMP-ISIJ, 12 (1999), 166, Apud: Li, B., and Fumitaka Tsukihashi, F., Modeling of circulating flow in RH degassing vessel water model designed for two- and multi-legs operations, ISIJ International, vol. 40, n°12, p 1203-1209.

Obata, F., Waka, K., Uehara, K., Ito, K. and Kawata, Y.:CAMP-ISIJ, 13 (2000), 93, Apud: Li, B., and Fumitaka Tsukihashi, F., Modeling of circulating flow in RH degassing vessel water model designed for two- and multi-legs operations, ISIJ International, vol. 40, n°12, p 1203-1209.

Park, Y-G. and Yi K-W, A new numerical model for predicting carbon concentration during RH degassing treatment, ISIJ International, Vol.43 (2003), N°9, p. 749-755.

Park, Y-G., Yi K-W., Ahn S-B., The Effect of Operating Parameters and Dimensions of the RH System on Melt Circulation Using Numerical Calculations, ISIJ International, Vol.41, N°5, p. 403-409, 2001.

Park, Y-G., Yi K-W., Ahn S-B., The Numerical Calculation of Circulation Flow Rate in the Degassing Rheinstahl-Heraeus Process, ISIJ International, Vol.40, N°8, p. 749-755, 2000.

Curso da Associação Brasileira de Metais, 1996, Real Palace Hotel (Belo Horizonte). Refino Secundário dos Aços, 17 a 20 de junho, p. 410.

Rovnushkin, V. A. , Visloguzova, É. A., Spirin, ., S. A., Shekhovtsov, E. V., Kromm., V. V. and Metelkin, A. A., Composition of ladle slag e refractory materials and its effect on the resistance of the lining of an vacuum degasser.

Sakaguchi, K. and Ito, K., Measurement of the Volumetric Mass Transfer Coefficient of Gas-stirred Vessel under Reduced Pressure, ISIJ International, vol. 35 (1995), n° 11, p. 1348-1353.

Seshadri, V., Costa, S.LS., Cold Model of RH Degassing, Transactions of ISIJ, Vol.26, Vol.26, p.133-138,1986.

Seshadri, V., P.S.B. Lacosqui, D.M. Moreira, I.A. da Silva, C.A. da Silva, V.A. Leão. A macroscopic model for inclusion removal in a RH degasser. Report presented in International Conference Advances in metallurgical processes and materials, Maio 27–30, 2007, Dnipropetrovsk, Ukraine, vol. 1.

Shirabe, K. and Szekely, J., A mathematical Model of Fluid Flow and Inclusion Coalescence in the RH Vacuum Degassing System, Transactions ISIJ, vol. 23, 1983, p 465-474.

Silva, C. A., Silva, I. A., Martins E. M. C., Seshadri, V., Perim, C. A., e Filho, G. A. V., Fluxo do fluido e características de mistura no desgaseificador RH da Companhia Siderúrgica de Tubarão, e a influência da injeção de gás no fundo e plugue poroso pelo estudo do modelo físico, Ironmaking Steel making, 2004, vol 31, n°1.

Takahashi, M., Matsumoto, H. & Saito, T., Mechanism of Decarburization in RH Degasser, ISIJ International, Vol. 35, N°12, pp. 14 52-1458, 1995.

Tatsuoka, T., Kamata, C.e Ito K. Expansion of injected gas bubble and its effects on bath mixing under reduced pressure. ISIJ International, vol. 37 (1997), n° 6, p. 557-561.

Tembergen, D., Teworte, R., Robey, R., Vacuum Ladle treatment using RH metallurgy, MPT International 3/2007.

Vargas, G.A. e Tavares, R. P., Modelagem Matemática e Física Do Desgaseificador a Vácuo RH da Companhia Siderúrgica Tubarão – CST, Dissertação de Mestrado, junho, 2000.

Venturini, G. and Goldschmit, M.B., Gas-Liquid Reaction Model in Gas-Stirred Systems: Part 1. Numerical Model, Metallurgical and Materials Transactions B, volume 38B, Junho, 2007, p. 461-475.

Watanabe, H., Asano, K & Saeki, T., Some Chemical Engineering Aspects of RH Degassing Process, Eletrical Furnace Steel, Transactions ISIJ, vol.9, p. 487 – 501, 1966 apud Martins, E., Silva, C., Estudo da Otimização de Um Desgaseificador RH por Meio de Modelagem Física, Universidade Federal de Ouro Preto, Março, 2003.

Yamaguchi, K., Kishimoto, Y., Saruraya, T., Fujii, T., Aratani, M. & Nishikawa, H., Effect of Refining Conditions for Ultra Low Carbon Steel on Decarburization Reaction in RH Degasser, ISIJ International, Vol. 32, Nº1, p . 126-135, 1992.

Yamana, H., Ebato, K., Katsuda, J., Nishiguchi, K., Improvement of Technique for Ultra-low-carbon Steel at Kakogawa Works, Kobelco Technology Review, Nº15, p. 17-20, 1992.

APÊNDICE I

Dimensionamento do modelo físico

Os números adimensionais utilizados são :

- Número adimensional de Froude (N_{Fr}):

$$N_{Fr} = \frac{V^2}{g \cdot D} \quad (1.1)$$

- Número adimensional de Reynolds (N_{Re}):

$$N_{Re} = \frac{D \cdot \rho \cdot V}{\mu} \quad (1.2)$$

- Número adimensional de Froude modificado (N_{Frm}):

$$N_{Frm} = \frac{u^2 \cdot \rho_{(gás)}}{\phi \cdot g \cdot (\rho_{(líquido)} - \rho_{(gás)})} \quad (1.3)$$

onde:

V = velocidade do líquido na perna de descida (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

D = diâmetro interno da perna de descida (m);

$\rho_{(líquido)}$ = densidade do líquido (kg/m^3);

$\rho_{(gás)}$ = densidade do gás (kg/m^3);

u = velocidade do gás (m/s);

μ = viscosidade molecular do líquido ($kg/m.s$);

ϕ = diâmetro dos bicos de injeção (m).

Utilizando a similaridade desses grupos adimensionais do modelo físico com o equipamento industrial, pode-se encontrar a relação da vazão de gás injetado e dos diâmetros dos bicos de injeção.

Para a similaridade cinética dos fluidos, considera-se o número de Froude para o equipamento industrial igual ao número de Froude para o modelo físico:

$$N_{FrI} = N_{FrM} \quad (1.4)$$

$$\frac{V_I^2}{g \cdot D_I} = \frac{V_M^2}{g \cdot D_M} \quad (1.5)$$

obtendo-se:

$$\left(\frac{V_I}{V_M}\right) = \left(\frac{D_I}{D_M}\right)^{1/2} \quad (1.6)$$

$$\left(\frac{V_M}{V_I}\right) = \left(\frac{D_M}{D_I}\right)^{1/2} \quad (1.7)$$

Utiliza-se o parâmetro (Q/D^2V) segundo Vargas (2000), para encontrar as relações entre a vazão de gás injetado do modelo físico, Q_M , em relação à vazão de gás injetado no equipamento industrial, Q_I :

$$\frac{Q_I}{D_I^2 \cdot V_I} = \frac{Q_M}{D_M^2 \cdot V_M} \quad (1.8)$$

$$Q_M = \left(\frac{D_M^2 \cdot V_M \cdot Q_I}{D_I^2 \cdot V_I} \right) \quad (1.9)$$

onde:

Q = vazão do gás injetado (m^3/s);

Substituindo (1.7) em (1.9), obtém-se:

$$Q_M = \frac{(D_M^2 \cdot D_M^{1/2} \cdot Q_I)}{(D_I^2 \cdot D_I^{1/2})} \quad (1.10)$$

$$Q_M = Q_I \left(\frac{D_M}{D_I} \right)^{5/2} \quad (1.11)$$

Sendo (D_M/D_I) igual ao fator de escala de 1:5, a relação de gás injetado do modelo físico em relação ao equipamento industrial:

$$\frac{Q_M}{Q_I} = \lambda^{5/2} \quad (1.12)$$

Levando em consideração que a vazão de gás no desgaseificador RH industrial, Q_I , é corrigida a partir por um fator de expansão do argônio, à medida que este ascende na perna de subida:

$$F_{\text{exp}} = \left(\frac{1873K}{273K} \right) \left(\frac{P_s}{P_{mi}} \right) \quad (1.13)$$

e

$$P_{mi} = \left(\frac{P_s + P_{v\u00e1cuo}}{2} \right) \quad (I.14)$$

onde:

P_s = pressão do sopro (101300Pa);

$P_{v\u00e1cuo}$ = pressão do v\u00e1cuo (66Pa);

P_{mi} = pressão m\u00e9dia industrial (50683Pa).

A equa\u00e7\u00e3o (I.12) fica:

$$Q_M = (Q_I^{CNTP} \cdot F_{exp}) \cdot \lambda^{5/2} \quad (I.15)$$

Logo, a rela\u00e7\u00e3o de g\u00e1s injetado do modelo f\u00edsico, Q_M , em rela\u00e7\u00e3o ao equipamento industrial, Q_I , passa a ser:

$$Q_M = 0,2453 \cdot Q_I \quad (I.16)$$

Considerando a similaridade do n\u00famero de Froude modificado, pode-se determinar a rela\u00e7\u00e3o de di\u00e2metro entre os bicos de inje\u00e7\u00e3o de g\u00e1s do modelo f\u00edsico, Φ_M , e do equipamento industrial, Φ_I ; Levando em considera\u00e7\u00e3o que:

$$u = \frac{Q}{A} \quad (I.17)$$

$$A = \frac{\pi \phi^2}{4} \quad (I.18)$$

onde A \u00e9 a \u00e1rea do orif\u00edcio.

Substituindo (I.2) e (I.17) em (I.16), obt\u00eam-se o n\u00famero de Froude modificado como:

$$N_{Frm} = \frac{Q^2 \cdot \rho_{(g\u00e1s)}}{\phi^5 \cdot g \cdot \rho_{(l\u00edquido)}} \quad (I.19)$$

Fazendo n\u00famero de Froude modificado do equipamento industrial, $N_{Fr \text{ modificado } I}$ = n\u00famero de Froude modificado do modelo $N_{Fr \text{ modificado } M}$:

$$\frac{Q_I^2 \cdot \rho_{I(g\u00e1s)}}{\phi_I^5 \cdot g \cdot \rho_{I(l\u00edquido)}} = \frac{Q_M^2 \cdot \rho_{M(g\u00e1s)}}{\phi_M^5 \cdot g \cdot \rho_{M(l\u00edquido)}} \quad (I.20)$$

obtendo-se:

$$\frac{\phi_M^5}{\phi_I^5} = \frac{Q_M^2}{Q_I^2} \left[\frac{\rho_{M(g\u00e1s)} \cdot \rho_{I(l\u00edquido)}}{\rho_{M(l\u00edquido)} \cdot \rho_{I(g\u00e1s)}} \right] \quad (I.21)$$

Para calcular a densidade dos gases do modelo físico e do equipamento industrial, consideram-se os gases como ideais, assim, tem-se:

$$\rho_{(gás)} = \frac{(P_m \cdot PM)}{R \cdot T} \quad (1.22)$$

onde:

PM = peso molecular;

R = constante dos gases ideais;

T = temperatura;

P_m = pressão média na perna de subida.

Logo a densidade do modelo fica:

$$\rho_{M(gás)} = \frac{(P_{m(M)} \cdot PM_M)}{R \cdot T_M} = \left(\frac{99850.0,029}{8,31.298} \right) = 1,169 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad (1.23)$$

e do equipamento industrial:

$$\rho_{I(gás)} = \frac{(P_{m(I)} \cdot PM_I)}{R \cdot T_I} = \left(\frac{50683.0,029}{8,31.1873} \right) = 0,130 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad (1.24)$$

Substituindo os valores encontrados das equações (1.11), (1.23) e (1.24) na equação (1.21), tem-se:

$$\frac{\phi_M^5}{\phi_I^5} = \left(\frac{D_M}{D_I} \right)^5 \left[\frac{\rho_{M(gás)} \cdot \rho_{I(líquido)}}{\rho_{M(líquido)} \cdot \rho_{I(gás)}} \right] \quad (1.25)$$

Assim, obtém-se a relação dos diâmetros dos bicos de injeção de gás:

$$\phi_M = 0,4539 \cdot \phi_I \quad (1.26)$$