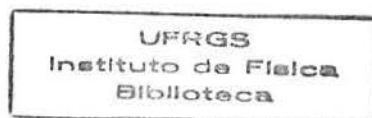


MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE FÍSICA

**SIMULAÇÃO NÚMERICA DO ESCOAMENTO EM MODELO FÍSICO DA  
ESTAÇÃO DE REFINO SECUNDÁRIO RH**

**ANDRÉ CARLOS CONTINI**



Orientador: Antonio Cezar Faria Vilela

Porto Alegre, 2007

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu amigo e colega de trabalho por seus conselhos, sua ajuda e sua infinita paciência neste trabalho: Bayard B.Morales. Agradeço também a minha mãe que rezou por mim nas horas mais difíceis e minhas irmãs pela força que me deram ao longo de todo o curso de física. Agradeço também aos meus amigos: Jumar V. Carvalho, Vicente Stefani, Leonardo Webber, Luciano Berchon pela parceria em todos bons e maus momentos ao longo de todo curso. Agradeço aos amigos Leandro Junges, Diefferson Lima pela paciência para explicar as minhas milhares de dúvidas depois de cada aula. Agradeço aos meus fieis amigos de Garibaldi: Dervilo Selle Jr, Vagner Maldotti, Guilherme P. Rodrigues e Alexandre Lazzari por todas as frases de apoio e por me mostrar que a vida é mais simples do que parece. Tenho que agradecer aos meus amigos da casa do estudante: Luis Caye, Junior Giacobbo, Marcelo Bocchi e Everton Fracarri pelas infinitas visitas que renderam infinitos diálogos.

## LISTA DE SIMBOLOS

$i$	Coordenada cartesiana x, y, z
$r_l$	Fração volumétrica da fase l
$\rho_l$	Massa específica do fluido
$u_i$	Velocidade na direção i
$x_j$	Espaço na direção i
$f_l$	Forças adicionais (arrasto, empuxo, etc.)
$S_l$	Fonte da fase l
Q	Taxa de circulação [kg/s]
G	Vazão de gás [NI/min]
D	Diâmetro da perna [m]
P <sub>1</sub>	Pressão na injeção de gás [atm]
P <sub>2</sub>	Pressão na câmara de vácuo [atm]

## SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	5
2 - OBJETIVOS.....	8
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
4 - METODOLOGIA.....	13
5 - DISCUSSÃO E RESULTADOS.....	18
6 - CONCLUSÕES.....	21
7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	22
8 - BIBLIOGRAFIA.....	23

## **1-INTRODUÇÃO**

### **1.1-A SIDERURGIA**

O aço é uma liga metálica composta de ferro e carbono principalmente. A siderurgia, isto é, a fabricação do aço, é um ramo da metalurgia. As usinas siderúrgicas podem ser divididas em usina integrada, usina semi-integrada e não-integrada.

Na usina integrada o aço é obtido do minério de ferro e sua elaboração ocorre em três etapas: redução, refino e lingotamento. Na semi-integrada tem-se, normalmente, como principal matéria-prima a sucata ferrosa. Aqui, há as fases de fusão, refino e lingotamento. Já a não-integrada possui somente uma das três etapas.

O processo siderúrgico integrado inicia-se com a chegada do minério de ferro, já beneficiado, no alto-forno, onde ocorre a redução dos óxidos de ferro mediante o emprego de um redutor, um material a base de carbono. Obtém-se uma solução líquida composta de Fe (solvente) e outros elementos como C, S, P, etc. (soluto). Esta solução, ou liga ferrosa, denomina-se ferro-gusa.

Na seqüência o ferro-gusa líquido é transportado para o convertedor, dentro do qual acontece a elaboração do aço, processo conhecido como refino primário. Ocorre sobretudo a diminuição dos teores de carbono, fósforo e enxofre. Ao final deste refino tem-se aço bruto.

Após o convertedor, é feito um ajuste fino no aço que se denomina refino secundário. Aqui, ocorre a homogeneização da temperatura e o aumento do grau de pureza do aço. Nesta etapa destaca-se o processo Rurhstal-Hereaus (RH) que será tratado com ênfase nesse trabalho.

A última fase é o lingotamento, onde ocorre a solidificação do aço. Uma visão geral dos processos siderúrgicos pode ser encontrada em Mourão et al [1].

### **1.2-RH**

O funcionamento do RH (figura 1) pode ser dividido em alguns passos. No primeiro passo a panela de aço líquido é colocada na estação de RH e as pernas são mergulhadas no banho. Após, o vaso começa a ser evacuado, causando a diminuição da pressão e elevação do aço líquido.

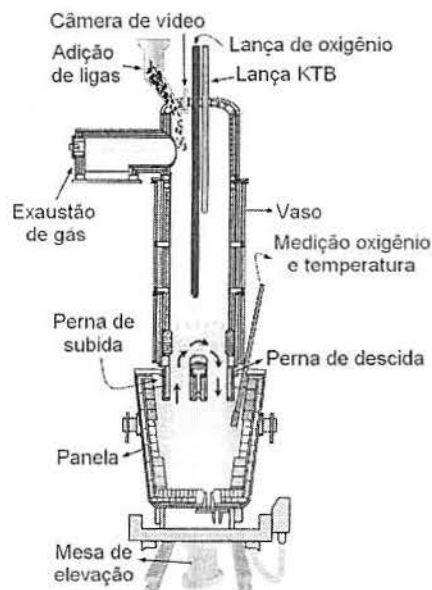
A segunda etapa inicia-se com a injeção do gás argônio na perna de subida. Esta injeção provoca a formação de bolhas de argônio dentro do aço líquido, que escoam no sentido do vaso pela diferença de densidade entre as fases (empuxo).

O sistema aço-gás configura um escoamento bifásico. Neste, tem-se a presença de várias forças, sendo as mais importantes chamadas de força de arrasto e empuxo.

Essas forças provocam a movimentação do aço líquido no mesmo sentido das bolhas de argônio, causando uma recirculação, conforme figura 1. Outra recirculação importante ocorre dentro da panela, onde se observa a presença de alguns vórtices, ideal para a mistura do aço e remoção de inclusões.

O principal parâmetro que caracteriza o processo RH é a taxa de circulação. Ela é medida pela quantidade de aço que passa por unidade de tempo em um das pernas. Operações como ajuste da composição química, desoxidação e remoção de inclusões não metálicas, etc. dependem fortemente dessa taxa. Até uma determinada faixa quanto mais alta é a taxa de circulação mais eficiente é o RH, como visto em Nakanishi et al [2].

Após o refino ocorre a abertura da válvula de pressão. Com isso o aço presente nas pernas e no vaso volta para a panela até atingir o equilíbrio barométrico. Feito isso, a panela desce e se desloca em direção à próxima etapa, o lingotamento. Informações mais detalhadas sobre o processo podem ser encontradas em Mourão et al [1].



**Figura 1.** Representação ilustrativa de um RH.

### 1.3-MODELAGEM

Na indústria siderúrgica há uma grande dificuldade de fazer medição em planta, devido principalmente ao alto custo e à alta periculosidade dos processos. Sendo assim, a maior parte da pesquisa em siderurgia é feita por três métodos: modelo físico, planta piloto e numérico-computacional.

O modelo físico é um equipamento em escala reduzida ou não, projetado mantendo a similaridade fluidodinâmica do problema. Outro fator importante é a escolha de um fluido com características semelhantes ao aço e de fácil manuseio, geralmente água. Esses modelos são ferramentas muito úteis na caracterização de processos e muitas vezes são utilizados como critério de validação de modelos matemáticos.

Outra abordagem é a utilização de uma planta-piloto, que é um equipamento em escala reduzida. Utiliza-se o próprio aço líquido, semelhante ao que ocorre na siderurgia. Pode-se assim ter resultados mais próximos quando comparado aos dados de planta. No entanto, tem um alto custo.

Na modelagem numérico-computacional de escoamentos é feita uma abordagem do problema físico por meio de equações que caracterizam um determinado fenômeno físico. Contudo, essas equações são na maioria não-lineares, e dificilmente possuem soluções analíticas. Isto não deixa outro caminho senão resolvê-las por meio de métodos numéricos com auxílio de computadores. Essa abordagem permite visualização e mensuração de aspectos específicos do escoamento de maneira rápida e custo relativamente baixo.

## 2-OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho são:

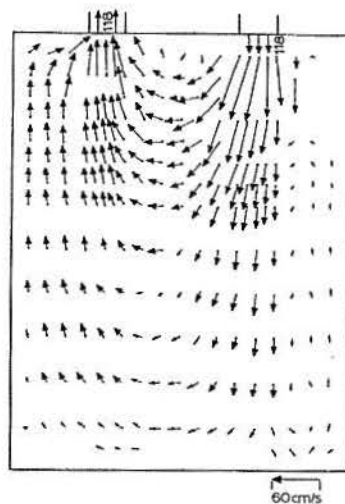
1. Aprender a utilizar um modelo numérico-computacional para simular o escoamento no RH. O foco é avaliar o comportamento da taxa de circulação em função da vazão de gás injetado para diferentes modelos de turbulência e diferentes tamanhos de bolhas.
2. Comparar os resultados da simulação com resultados obtidos em um modelo físico desenvolvido pelo Laboratório de Simulação de Processos (Lasip) da UFMG.



### 3-REVISÃO BIBLIOGRAFICA

#### 3.1-Simulação numérico-computacional

Um dos primeiros modelos matemáticos para o estudo do RH foi desenvolvido por Nakanishi et al [2] em 1975. Com uma modelagem computacional em duas dimensões verificou-se um fluxo de água que se movia diretamente da perna de descida para a perna de subida, o chamado fluxo em curto-circuito, conforme figura 2. Essa abordagem teve resultados para os tempos de mistura que discordaram da realidade.



**Figura 2.** Campo vetorial da velocidade do escoamento na panela do RH, sobre o plano de simetria [2].

A modelagem bidimensional foi uma tentativa simplificada de abordar o problema. No entanto, não foi possível representar a realidade física, devido a uma grande zona de estagnação no fundo da panela. Os próprios autores ressaltam que o modelo bidimensional é uma simplificação grosseira do RH.

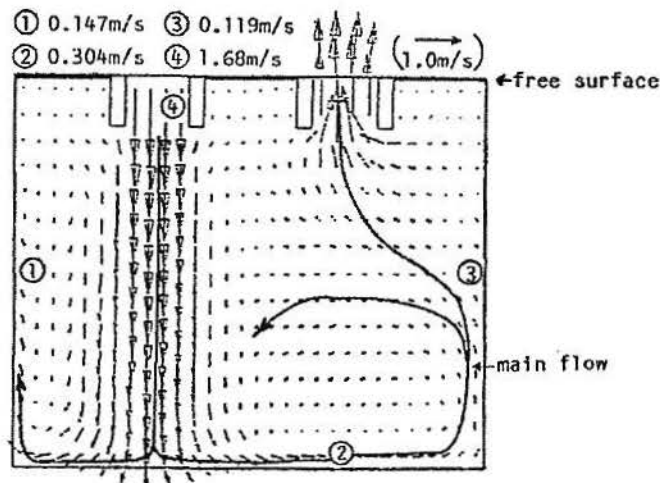
No trabalho desenvolvido por Kuwabara et al [3] 1988, foi proposta a equação (1) para estimar a taxa de circulação no modelo de água e a equação (2) para RH em escala plena.

$$Q = 49G^{1/3} D^{4/3} (\ln(\frac{P_1}{P_2}))^{1/3} \quad (1)$$

$$Q = 11,4G^{1/3} D^{4/3} \left( \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \right)^{1/3} \quad (2)$$

Essas equações foram deduzidas a partir do balanço de energia entre o líquido e o gás injetado. Foram validadas para uma ampla banda de parâmetros experimentais. Elas balizaram vários estudos posteriores.

Em 1989, Tsujino et al [4] foi o primeiro a simular numericamente uma panela tridimensional do RH. Com isso, percebeu-se que não houve a presença de um curto-circuito, conforme a figura 3.



**Figura 3.** Campo vetorial da velocidade do escoamento na panela do RH, sobre o plano de simetria [4].

Outro resultado desse estudo foi a avaliação dos efeitos da taxa de circulação no escoamento do aço e na distribuição de um traçador. Demonstrou-se que houve um aumento nas velocidades e melhores condições de homogeneização quando a taxa de circulação era mais elevada.

Concluiu-se também neste trabalho, que os efeitos de diferentes posições relativas das pernas de subida e de descida não provocaram mudanças significativas na distribuição do traçador e no perfil do escoamento.

Ahrenhold et al [5] em 1998, modelaram um sistema de equações algébricas para o cálculo da taxa de circulação no RH. Com essa abordagem se conseguiu mostrar

que a taxa de circulação apresenta um comportamento assintótico para altas vazões de gás, ao contrário da previsão feita nas equações propostas por Kuwabara (eqs. 1 e 2). Este comportamento é chamado de saturação.

Em 2004, Ajmani et al [6] abordou a evolução da mistura em um RH usando um modelo tridimensional para simular a panela, similar à abordagem feita por Tsujino et al [4] em 1989.

Seu principal resultado neste trabalho foi a validação de uma correlação adimensional para a obtenção do tempo de mistura. Ela foi obtida por meio de resultados em planta para diferentes condições de operação.

Foi avaliado, também, o efeito de diversos diâmetros de snorkels, a profundidade de imersão deles e as velocidades do aço na perna de descida, por meio da distribuição de um traçador. A conclusão foi que as pernas com diâmetro maior, maior profundidade de imersão e o aumento da velocidade provocaram redução no tempo de mistura.

No artigo publicado por Kishan et al [7] em 2006, foi realizada uma abordagem tridimensional de um RH completo, ou seja, simulou-se o escoamento simultaneamente no vaso, pernas e panela.

Para isso, estudaram um escoamento em formato de U ligado a um vaso semelhante ao do RH. Na simulação foram utilizados água e ar, tanto no modelo físico quanto na simulação numérica.

A interação entre o líquido e o gás injetado é conhecido como um problema de duas fases. Nessa interação ocorre um acréscimo no número de parâmetros envolvidos e torna-se necessário considerar: o tamanho das bolhas, forças de arrasto e de não-arrasto, etc. Também foi ressaltado que na abordagem de um modelo de duas fases eleva-se consideravelmente o tempo de computação.

Após conseguir a validação do modelo em U, realizou-se simulação numérica de um RH completo em escala industrial, utilizando o sistema argônio e aço. O resultado foi uma baixa taxa de circulação.

Os autores afirmam que não foi possível fazer uma simulação precisa do processo devido a várias dificuldades práticas como, por exemplo, considerar o escoamento como isotérmico e incompressível. Isso negligencia a expansão do gás. Contudo, considerou-se a simulação um passo para tentar descrever um RH completo.

### 3.2-Modelos Físicos

Os modelos físicos são uma das principais ferramentas para o estudo de um problema fluidodinâmico, porque nos permitem tirar informações valiosas sobre o escoamento em questão. No RH, por exemplo, eles servem principalmente para medir a taxa de circulação e avaliar o comportamento de mistura.

No trabalho desenvolvido por Nakanishi et al [2] em 1975, ele utilizou como metodologia para estimar a velocidade do fluido o procedimento de filmar o caminho percorrido pela serragem (pedaços pequenos de madeira) colorida dentro de um modelo físico. Para o estudo do fenômeno de mistura dentro do RH foi utilizada uma tinta solúvel, sendo que os fluidos utilizados foram água e parafina, sendo o argônio como gás de injeção.

O resultado desse estudo foi que em água a mistura se deu em um tempo menor do que em parafina, conforme era esperado. Também se percebeu que houve a presença de um curto-circuito no escoamento no teste com parafina.

Já no artigo publicado por Seshadri et al [8] em 1986, foi medida a taxa de circulação por meio da evolução com o tempo da concentração de NaCl adicionado ao fluido em um ponto da perna de subida. Esta concentração foi medida por meio da condutividade da água. O líquido utilizado para o experimento foi água e o gás nitrogênio.

Suas principais conclusões foram que a taxa de circulação aumentou com o acréscimo da taxa de injeção do gás e maior distância entre nível da água e injetores. Também se verificou que o máximo da taxa de circulação ocorreu quando o nível de água coincidiu com o topo da perna de subida.

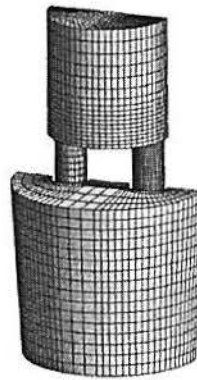
Em 2007 no artigo publicado por Nascimento et al [9], foi estudada a influência dos diâmetros dos bicos de injeção na taxa de circulação através de um modelo físico. Verificou-se que o aumento no diâmetro do bico de injeção tende a aumentar a taxa de circulação. Observou-se, também, que para um dado diâmetro de bico e acima de uma dada vazão, a taxa de circulação tende a permanecer aproximadamente constante ou até decrescer, verificando o fenômeno de saturação.

#### 4-METODOLOGIA

Neste trabalho foi feita uma simulação numérico-computacional de um modelo físico de RH. Para isto, foram seguidos os seguintes passos: determinação da geometria, discretização do domínio (construção da malha), pré-processamento, processamento e pós-processamento. Esses passos são definidos da seguinte forma:

1. Determinação da geometria: é a construção de uma geometria que descreva o equipamento. Pode ser feita em duas ou três dimensões por meio de linhas ou superfícies, respectivamente.
2. Discretização: é um conjunto suficientemente grande de pontos e volumes que estão fixos e definidos dentro da geometria. Em cada um desses pontos são calculadas as funções definidas do problema.
3. Pré-processamento: etapa na qual são definidas as condições de contorno, condições iniciais e os modelos utilizados, propriedades física dos fluidos.
4. Processamento: solução do sistema de equações algébricas, formado na discretização das equações diferenciais do problema de contorno.
5. Pós-processamento: análise do escoamento por meio de diferentes abordagens, tanto qualitativamente quanto quantitativamente.

Na determinação da geometria considerou-se as dimensões do modelo físico do grupo Lasip [9]. Com isso, será possível ao final do trabalho comparar os resultados experimentais com os simulados numericamente. Devido à simetria do equipamento foi possível simplificar o estudo considerando apenas a metade do mesmo, conforme figura 4.



**Figura 4.** Malha tridimensional do modelo físico do RH com 50.000 nós.

Dimensões do modelo físico do grupo Lasip:

Parâmetros	Valor
<b>Panela:</b> - diâmetro superior (m) - diâmetro inferior (m) - altura (m) - nível de líquido (m)	0,720 0,648 0,750 0,655
<b>Câmara de vácuo:</b> - diâmetro (m) - altura (m) - nível de líquido (m) - pressão relativa (Pa)	0,415 0,700 0,090 -2700
<b>Pernas:</b> - comprimento (m) - diâmetro (m) - profundidade de imersão (m) - distância entre centros (m)	0,312 0,120 0,120 0,300
<b>Injeção de gás:</b> - vazão (l/min – condições padrão) - bicos de injeção: - número - diâmetros (m) - posição (acima do topo da panela) (m)	50-500 10 0,001 0,04

**Tabela 1.** Características do modelo físico e do sistema de injeção de gás [9].

A discretização da geometria foi feita duas vezes. Na primeira vez foi construída uma malha de aproximadamente cinquenta mil nós, com uma maior discretização na perna de subida em relação às outras partes do RH.

Na segunda, a malha construída foi de aproximadamente duzentos mil nós e com uma discretização ainda maior na secção transversal da perna de subida.

Na solução de um escoamento são utilizadas as equações de Navier-Stokes (3) e a equação da continuidade (4). Elas formam um conjunto de equações que descrevem a conservação de massa e momento. Além disso, foi considerada a conservação de fração volumétrica (5):

Equação de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial(r_i \rho_i u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(r_i \rho_i u_i u_j)}{\partial x_j} = -r_i \nabla p + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ r_i \mu_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i \quad (3)$$

Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial \rho_i r_i}{\partial t} + \frac{\partial(r_i \rho_i u_i)}{\partial x_i} = S_i \quad (4)$$

Fração volumétrica:

$$r_{\text{água}} + r_{\text{ar}} = 1 \quad (5)$$

Entretanto, devido à presença de turbulência no escoamento não se consegue resolver as equações instantâneas (3) e (4) diretamente. É necessário abordar o escoamento por meio de equações médias (conhecidas como equações médias de Reynolds, RANS). Nestas faz-se necessário a utilização de modelos de turbulência como k- $\omega$  e k- $\epsilon$ .

Para a abordagem do modelo físico em questão teve-se que fazer algumas simplificações, como:

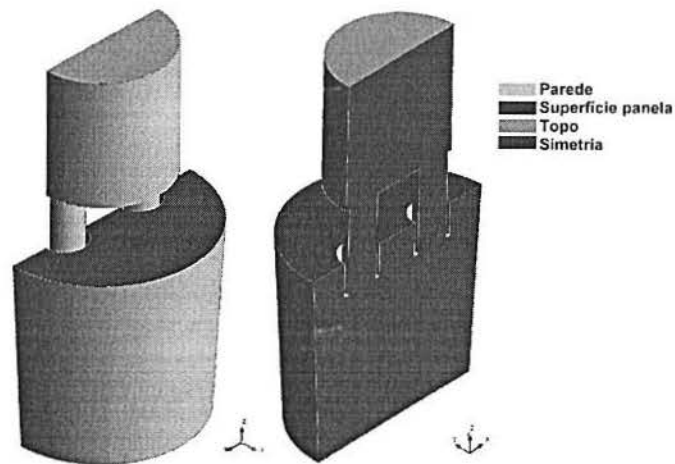
1. O escoamento foi considerado incompressível;
2. Temperatura constante em todo modelo;
3. O tamanho médio de bolha foi mantido fixo.

As condições de contorno, que podem ser vistas na figura 5, são:

- Parede:
  - Água: não-eskorregamento

- Ar: sem atrito
- Simetria:
  - Gradientes nulos
- Superfície panela:
  - Sem atrito
- Topo:
  - Saída de gás

Tem-se na figura essas diferentes regiões:



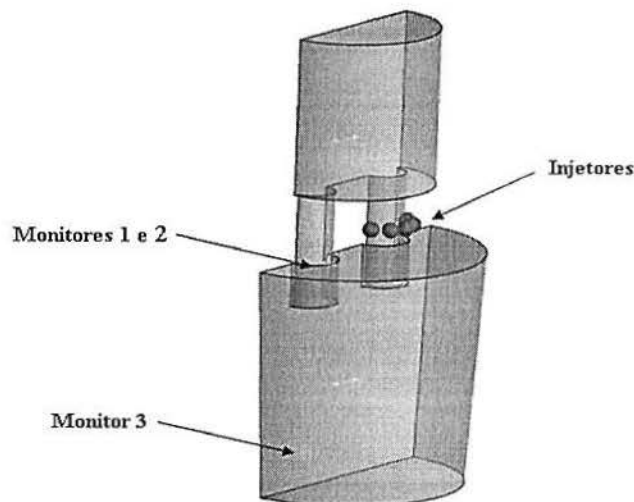
**Figura 5.** Condições de contorno do RH.

Para a discretização e solução dessas equações utilizou-se o software comercial Ansys CFX [10] em computadores do tipo PC. Este programa utiliza o método de solução chamado de volumes finitos baseados em elementos. O esquema de evolução temporal adotado foi o de transiente real, em face da difícil convergência do transiente distorcido.

Durante a solução monitorou-se a convergência. Para isso, distribuiu-se três pontos de monitoramento no RH em diferentes coordenadas, conforme figura 6. Atribuiu-se o problema como convergido quando as velocidades do escoamento nesses pontos apresentavam-se constantes ao longo do tempo. O tempo médio de convergência variou entre 12 e 24 horas.



A última etapa é o pós-processamento. Nela, é possível visualizar campos de velocidade, pressão, fração volumétrica, etc. Além disso, calcular taxa de circulação.



**Figura 6.** Pontos de monitoramento e posição dos injetores no RH.

Para saber se o modelo numérico representa a realidade física analisou-se o principal parâmetro do RH, ou seja, a taxa de circulação em função da vazão de gás injetado nos injetores.

Para ajustar o modelo numérico-computacional ao modelo físico, fizeram-se estudos da taxa de circulação em função de diferentes modelos de turbulência, tamanhos de bolhas e a influência da malha na fração volumétrica.

No primeiro, comparou-se o modelo físico aos resultados da simulação numérica com os modelos de turbulência  $k-\epsilon$  e  $k-\omega$ .

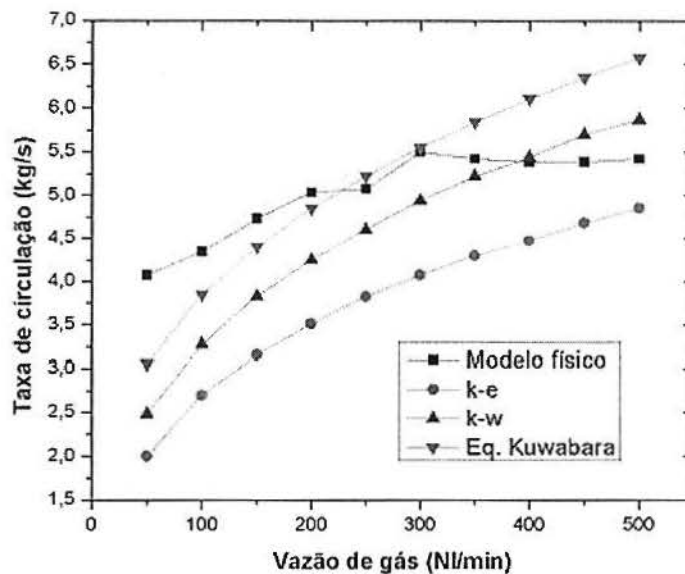
Devido à dificuldade em saber o tamanho médio de bolha no modelo físico, estudou-se sua influência na velocidade do escoamento.

Por último, estudou-se a fração volumétrica de gás na perna de subida, para saber se a malha é adequada. Isso foi feito por meio de um corte transversal a cinco centímetros acima do nível de injeção e comparada com uma foto do modelo físico.

## 5- RESULTADOS E DISCUSSÃO

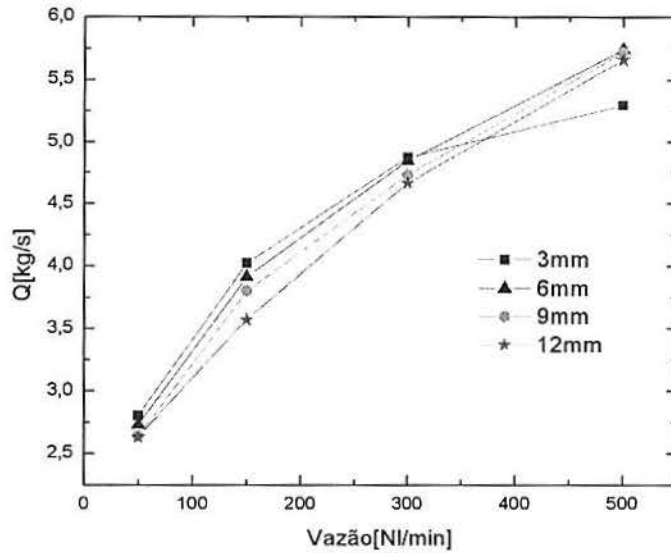
Na figura 7, é mostrada a taxa de circulação em função da vazão de gás injetado para diferentes modelos de turbulência. Pode-se ver que tanto o modelo  $k-\omega$  quanto o modelo  $k-\varepsilon$  apresentaram taxas de circulação muito baixas se comparadas com as do modelo físico obtidas pela equipe do Lasip.

Outra divergência dos modelos de turbulência em relação ao resultado físico apresentado foi que, para vazões elevadas, nenhum dos modelos de turbulência apresentou saturação.



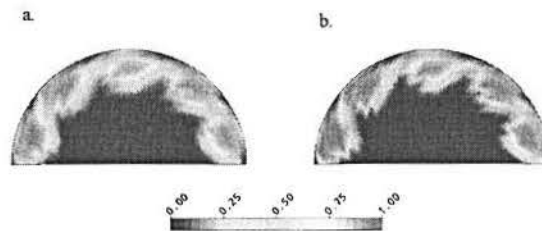
**Figura 7.** Resultado da taxa de circulação para diferentes modelos de turbulência, comparando com resultado experimental e previsão de Kuwabara em uma malha de 50.000 nós.

No estudo da influência das bolhas sobre a taxa de circulação em função da vazão de gás, constatou-se que o tamanho de bolha não altera de maneira apreciável a taxa de circulação, conforme mostrado na figura 8.

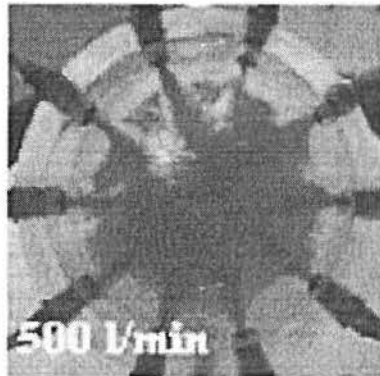


**Figura 8.** Resultado da taxa de circulação para diferentes tamanhos de bolhas em uma malha de 50.000 nós.

Na figura 9, observa-se a penetração do jato na perna de subida, por meio de um corte transversal, a 5 cm acima dos injetores. Constata-se, para uma malha de cinquenta mil nós, que a penetração de gás foi rasa, ou seja, a coluna de gás ficou praticamente junto à parede da perna tanto no modelo  $k-\omega$  quanto no modelo  $k-\epsilon$ . Isso não representa a realidade física, pois no modelo físico a penetração do jato é maior, conforme figura 10.

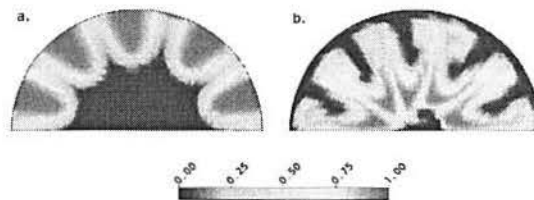


**Figura 9.** Fração volumétrica de gás na perna de subida, plano  $z = 0,75$  m, para modelos de turbulência  $k-\omega$  (fig. 9a) e  $k-\epsilon$  (fig. 9b) em uma malha de 50.000 nós.



**Figura 10.** Foto do modelo físico da injeção de gás na perna de subida [9].

Na figura 11, visualiza-se a fração volumétrica em uma malha de duzentos mil nós. No modelo  $k-\omega$  o gás manteve-se colado na periferia da perna. Já no modelo  $k-\epsilon$  a penetração do jato foi maior. Isso levou a desprezar o modelo  $k-\omega$  e assim considerar apenas o modelo  $k-\epsilon$ , pois representa melhor a realidade física.



**Figura 11.** Fração volumétrica de gás na perna de subida, plano  $z = 0,75$  m, para modelos de turbulência  $k-\omega$  (fig. 9a) e  $k-\epsilon$  (fig. 9b) em uma malha de 200.000 nós.

## 6-CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvida uma simulação numérica sobre o escoamento de água e ar de um modelo físico de RH. As conclusões foram as seguintes:

1. Para uma malha de aproximadamente cinquenta mil nós, a simulação numérica não representou o modelo físico de maneira satisfatória tanto para o modelo de turbulência  $k-\omega$  quanto para o  $k-\epsilon$ .
2. Ainda para uma malha de cinquenta mil nós, mostrou-se que o tamanho de bolha não alterou de maneira apreciável taxa de circulação. Isso leva a desconsiderar os resultados com a malha de cinquenta mil.
3. No estudo da penetração do jato com diferentes discretizações concluiu-se que para um malha de duzentos mil nós o modelo  $k-\epsilon$  representa melhor a realidade. Isso levou a desconsiderar o modelo  $k-\omega$ .

## **7-SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Apresentam-se, a seguir, algumas sugestões de trabalhos com a finalidade de complementar os estudos realizados neste trabalho de conclusão de curso analisando:

- a taxa de circulação para diferentes vazões em uma malha de 200.000 nós;
- a influência das bolhas para uma malha de 200.000 nós;
- outros modelos de turbulência;
- forças de não-arrasto.

## 8-REFERÊNCIAS

- [1] MOURÃO M. B., YOKOJI A., MALYNOWSKYJ A. et al, **Introdução à Siderurgia**, 2007.
- [2] K. NAKANISHI, J. SZEKELY e C. W. CHANG, **Experimental and theoretical investigation of mixing phenomena in the RH-vacuum process**, Ironmaking and Steelmaking (Quarterly), n 2, p 115-123, 1975.
- [3] T. KUWABARA, K. UMEZAWA, K. MORI e H. WATANABE, **Investigation of Decarburization Behavior in RH-reactor and Its Operation Improvement**, Transactions ISIJ, vol. 28, p 305-314, 1988.
- [4] R. TSUJINO, J. NAKASHIMA, M. HIRAI e I. SAWADA, **Numerical Analysis of Molten Steel Flow in Ladle of RH Process**, ISIJ International, vol. 29, n.7, p 589-595, 1989.
- [5] F. AHRENHOLD e W. PLUSCHKELL, **Circulation rate of liquid steel in RH degassers**, Steel research , vol 69, n.2, p 54-59, 1998.
- [6] S. K. AJMANI, S. K. DASH, S. CHANDRA e C. BHANU, **Mixing Evaluation in the RH Process Using Mathematical Modelling**, ISIJ International, vol. 44, n. 2, p 82-90, 2004.
- [7] P. A. KISHAN e S. K. DASH, **Numerical and experimental study of circulation flow rate in a closed circuit due to gas jet impingement**, Int. J. of Num. Meth. for Heat & Fluid Flow, vol. 16, n. 8, p 890-909, 2006.
- [8] V. SESHADRI e S. L. S. COSTA, **Cold Model Studies of R.H. Degassing Process**, Transactions ISIJ, p 133-137, 1986.
- [9] A. A. do NASCIMENTO, H. L. V. PUJATTI, R. P. TAVARES, **Simulação física do escoamento de fluidos e da descarburização em desgaseificadores RH**, XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional, p 830-840, 2007.
- [10] Ansys Technology, CFX 11.0, **Solver Manual**, Harwell 2007.