

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

“Desenvolvimento de modelo matemático do fluxo de líquidos no  
cadinho do alto-forno”

Autora: Beatriz Fausta Gandra

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Andrade de Castro (UFMG)

Co-orientador: Prof. Dr. José Adilson de Castro (UFF)

Setembro/2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Beatriz Fausta Gandra

DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO DO  
FLUXO DE LÍQUIDOS NO CADINHO DO ALTO-FORNO

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. Dr. Luiz Fernando Andrade de Castro

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2006

Aos meus pais: Antônio e Araminta.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que colaboraram na preparação deste trabalho e em particular:

- ◆ ao professor Luiz Fernando Andrade de Castro pela dedicação, carinho, atenção, disponibilidade e orientação;
- ◆ ao professor José Adilson de Castro pela disponibilização do modelo previamente desenvolvido, pelas valiosas dicas apresentadas, pela paciência, ensinamento e orientação;
- ◆ aos colegas Ricardo Miranda Alé e Eduardo Avelar Tonelli, pelo apoio gerencial dado a este projeto;
- ◆ aos amigos do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas pelo incentivo e pelas sugestões. Especialmente aos engenheiros Luís Augusto Marconi Scudeller e Henriquison Magela Bottrel Reis pelas discussões técnicas, sugestões e ensinamentos, e aos técnicos Antônio Alberto Moreira Pinto e José Barony de Castro pela colaboração no desenvolver do trabalho;
- ◆ à superintendência de Coquerias, Sinterizações e Altos-Fornos, em especial à Gerência Técnica de Altos-Fornos e à Gerência do Alto-Forno 3 pelas informações prestadas, pela disponibilização de dados e pelo incentivo, sempre;
- ◆ ao engenheiro José de Souza Carvalho pelo apoio na definição do tema, pelo acompanhamento e discussões técnicas, e pela amizade a mim dedicada;
- ◆ ao engenheiro Mauro Vivaldino Fernandes pelo exemplo de força, humildade e competência;
- ◆ às Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais (Usiminas), Universidade Federal de Minas Geras (UFMG) e Universidade Federal Fluminense (UFF) pela oportunidade de desenvolver essa dissertação;
- ◆ aos meus pais, que me são exemplo de vida;
- ◆ aos meus irmãos e familiares pelo apoio e carinho de sempre;
- ◆ a todos os meus amigos pela compreensão, apoio e incentivo;
- ◆ a Deus por estar sempre presente em minha vida.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>X</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO.....</b>	<b>3</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
3.1 A SPECTOS INTERNOS DO ALTO-FORNO.....	4
3.2 FUNCIONAMENTO DO ALTO-FORNO.....	5
3.3 FURROS DE CORRIDA DE ALTOS-FORNOS.....	6
3.4 NÍVEL DE LÍQUIDOS NO CADINHO E SEUS EFEITOS.....	8
3.5 MODELAGEM DO FLUXO DE LÍQUIDOS NO CADINHO .....	15
3.5.1 <i>Considerações Gerais da Modelagem Física</i> .....	15
3.5.2 <i>Escoamento da Escória</i> .....	18
3.5.3 <i>Escoamento do Gusa</i> .....	23
3.5.4 <i>Modelos Matemáticos de Escoamento de Líquidos no Cadinho</i> .....	28
3.5.5 <i>Descrição do Modelo Matemático</i> .....	48
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>55</b>
4.1 MODELO MATEMÁTICO.....	55
4.2 ESCOLHA DO ALTO-FORNO .....	55
4.3 INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS.....	55
4.4 DETERMINAÇÃO DA FLUTUAÇÃO DO HOMEM MORTO.....	56
4.5 ENTENDIMENTO, ADEQUAÇÃO E APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO.....	56
<b>5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>58</b>
5.1 ÍNDICE MÁXIMO DE ENCHIMENTO DO CADINHO.....	58
5.2 FLUTUAÇÃO DO HOMEM MORTO.....	62
5.3 DOMÍNIO COMPUTACIONAL E GEOMÉTRICO.....	65
5.4 CONDIÇÕES DE CÁLCULO .....	66
5.5 VALIDAÇÃO DO MODELO .....	67
5.6 FLUXO DE LÍQUIDOS NO CADINHO .....	68
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>81</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>83</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 3.1 – Regiões do alto-forno.....	5
Figura 3.2 – Variação na pressão de sopro do ar em função do ciclo de vazamento de gusa e escória, segundo Kitaev <i>et al.</i> , citada por Figueira <i>et al.</i> .....	9
Figura 3.3 – Variação na vazão de ar em função do tempo após o vazamento de gusa e escória, altos-fornos de Port Kembla, segundo Wagner, citado por Figueira <i>et al.</i> .....	10
Figura 3.4 – Seção vertical do cadinho com posições distintas do homem morto, AF5 – Higashida (a) e AF4 – Kukioka (b), segundo Kanbara <i>et al.</i> , citado por Figueira <i>et al.</i> .....	11
Figura 3.5 – Vista esquemática das forças atuantes no cadinho de um alto-forno e que determinam a posição do homem morto.....	12
Figura 3.6 – Fração de vazios no cadinho em função da qualidade do coque.....	13
Figura 3.7 – Efeito do nível médio de líquido no cadinho sobre o formato da superfície de escória, segundo Hatano <i>et al.</i> , citado por Figueira <i>et al.</i> .....	18
Figura 3.8 – Efeito da vazão de gás que sai da zona de combustão sobre os níveis de escória ao longo do raio do forno, segundo Hatano <i>et al.</i> , citado por Figueira <i>et al.</i> .....	19
Figura 3.9 – Vista esquemática da drenagem da escória do cadinho de alto-forno.....	20
Figura 3.10 – Relação entre a fração de escória retida e o coeficiente de escoamento.....	21
Figura 3.11 – Definição de $S^*$ em termos das dimensões do cadinho.....	24
Figura 3.12 – Trajetórias do ferro-gusa e o relacionamento entre $S^*$ e $t^*$ , quando o homem morto está apoiado no fundo do cadinho, segundo Ohno <i>et al.</i> , citado por Figueira <i>et al.</i> .....	25
Figura 3.13 – Trajetórias do ferro-gusa e o relacionamento entre $S^*$ e $t^*$ , quando o homem morto não está apoiado no fundo do cadinho, segundo Ohno <i>et al.</i> , citado por Figueira <i>et al.</i> .....	26
Figura 3.14 – Painel superior: simulação do nível de gusa e escória para homem morto flutuando (linhas contínuas), e o sinal medido (linha tracejada). Painel central: vazão de gusa (linha contínua) e escória (linha tracejada), bem como taxa de produção das duas fases (linha tracejada praticamente horizontal). Painel inferior: temperatura do metal líquido para as sete corridas.....	32
Figura 3.15 – Sistema assumido para modelagem.....	33
Figura 3.16 – Cadinho de alto-forno.....	36
Figura 3.17 – Efeito do diâmetro as partículas de coque na espessura média do gusa e da escória.....	41
Figura 3.18 – Efeito da viscosidade da escória na taxa de drenagem de gusa e escória.....	42
Figura 3.19 – Espessura média de gusa e escória para diferentes configurações do leito. a) Zona de elevada permeabilidade periférica; b) Permeabilidade uniforme; c) Zona de baixa permeabilidade periférica.....	42
Figura 3.20 – Análise dos líquidos e amostragem dos finos ao longo do raio.....	44
Figura 3.21 – Diferentes áreas no cadinho.....	44
Figura 3.22 – Aumento da zona de baixa permeabilidade.....	44
Figura 3.23 – Exemplos de perfil de temperatura observado em diferentes zonas.....	45
Figura 3.24 – Temperatura e tempo de residência no nível das ventaneiras do AF1-Fos.....	45
Figura 3.25 – Exemplo do perfil de temperatura no nível da ventaneira durante aumento no CSR da carga de coque.....	46
Figura 3.26 – Efeito da velocidade superficial dos gases no arraste de líquidos e o gradiente de pressão no alto-forno.....	47
Figura 3.27 – Predição do fluxo de líquidos na entrada do cadinho.....	47
Figura 3.28 – Molécula esquemática do volume de controle em 3-D.....	51
Figura 3.29 – Fluxo esquemático do modelo.....	54
Figura 5.1 – Montagem do refratário do cadinho do AF3.....	60
Figura 5.2 – Relação entre produção e tempo máximo permitido entre corridas.....	61
Figura 5.3 – Influência das diversas variáveis na distância entre o fundo do cadinho e ao início da coluna de coque estagnado.....	62
Figura 5.4 – Flutuação do homem morto, resultado por corrida.....	64
Figura 5.5 – Variação do fluxo térmico, resultado em média no início da corrida.....	64
Figura 5.6 – Variação da pressão de sopro de ar quente, resultado em média no início da corrida.....	65
Figura 5.7 – Malha bidimensional do cadinho.....	66

Figura 5.8 – Malha tridimensional do cadinho.....	66
Figura 5.9 – Velocidade de saída do material no furo de gusa. ....	67
Figura 5.10 – Evolução do tempo de residência do material líquido. ....	76
Figura 5.11 – Linha de fluxo e tempo de residência para diferentes situações.....	78
Figura 5.12 – Linhas de fluxo, ao avaliar a distribuição do coque no cadinho.....	79
Figura 5.13 – Linhas de fluxo, avaliando a alteração do homem morto.....	80
Figura 5.14 – Temperatura do líquido, respectivamente nas condições de homem morto assentado, coque com diâmetro variando ao longo do raio e homem morto flutuando. ....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Características da escória. ....	37
Tabela III.2 – Características do ferro-gusa. ....	37
Tabela III.3 – Condições computacionais.....	38
Tabela III.4 – Propriedades da camada de coque utilizadas na análise numérica. ....	38
Tabela III.5 – Propriedades físicas dos líquidos no alto-forno.....	38
Tabela IV.1 – Balanço de forças para determinação da flutuação do homem morto.....	56
Tabela V.1 – Características do AF3 Usiminas. ....	58
Tabela V.2 – Dados operacionais do AF3 Usiminas, média anual/2005.....	58
Tabela V.3 – Valores de condutividade térmica (W/m°C). ....	59
Tabela V.4 – Coeficientes para o cálculo da condutividade térmica dos materiais refratários do cadinho.....	59
Tabela V.5 – Produção do AF3 e tempo máximo permitido entre corridas.....	61
Tabela V.6 – Variação da flutuação do homem mo rto. ....	63
Tabela V.7 – Condição padrão para cálculo no modelo.....	67

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- A** - área do cadinho ( $m^2$ );  
**C<sub>E</sub>** - coeficiente de escoamento;  
**C<sub>p<sub>s</sub></sub>** - capacidade térmica do sólido ( $W/m\ ^\circ C$ );  
**D** - diâmetro do cadinho (m);  
**d** - diâmetro das partículas de coque no cadinho (mm);  
**dP/dt** - variação da pressão (bar/h);  
**e** - rugosidade (m);  
**E<sub>c</sub>** - índice de enchimento do cadinho (-);  
**F** - fração de escória retida (-);  
**f** - fator de fricção (-);  
**F<sub>R</sub>** - resistência ao fluxo (-);  
**g** - aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );  
**G** - produção, obtida pelo balanço de oxigênio (t/d);  
**h** - altura de material líquido no cadinho (m);  
**H<sub>HM</sub>** - espessura da camada de metal, com coque (m);  
**h<sub>i</sub>** - coeficiente de troca de calor na superfície dos líquidos ( $W/m^2K$ );  
**h<sub>i-s</sub>** - coeficiente de troca de calor entre líquidos e sólido ( $W/m^2K$ );  
**h<sub>s</sub>** - coeficiente de troca de calor na superfície do sólido ( $W/m^2K$ );  
**H<sub>SL</sub>** - espessura da camada de escória, com coque (m);  
**k<sub>i</sub>** - condutividade térmica dos líquidos, i – metal, s – escória ( $W/mK$ );  
**L** - comprimento do furo de gusa (m);  
**l** - espessura da camada de ferro-gusa no cadinho (m);  
**M<sub>D</sub>** - massa de escória produzida durante um dia (t/d);  
**N<sub>v</sub>** - número de vazamentos durante um dia (-);  
**P** - pressão interna do alto-forno (Pa);  
**Pr** - número de Prandtl (-);  
**Q** - energia (W);  
**Q<sub>p</sub>** - taxa de produção de gusa e escória, expressa em termos de volume destes dois materiais ( $m^3/min$ );  
**Re** - número de Reynolds (-);  
**r<sub>h</sub>** - raio hidráulico (m);  
**S** - área do cadinho coberta por um círculo de centro no furo de corrida ( $m^2$ );  
**SR** - *slag-rate* (kg/t);  
**S<sup>\*</sup>** - posição ponderada (-);

- $S_o$  - área do cadinho ( $m^2$ );  
 $t$  - tempo (min ou s);  
 $t^*$  - tempo de residência ponderado (-);  
 $T_a$  - período de acumulação: tempo entre o final de um vazamento e o início da próxima corrida (min);  
 $t_M$  - tempo médio de residência do gusa no cadinho (min);  
 $T_R$  - taxa de retirada da escória durante o vazamento (t/d);  
 $T_{RM}$  - taxa de vazamento do gusa (t/min);  
 $T_V$  - tempo de duração do vazamento de escória (min);  
 $U$  - velocidade do fluido (m/s);  
 $u_i$  - velocidade (m/s);  
 $V_c$  - volume do cadinho [volume da região entre as ventaneiras e o furo de corrida] ( $m^3$ );  
 $V_{HM}$  - volume de metal presente no cadinho ( $m^3$ );  
 $V_o$  - velocidade da escória em relação à área do cadinho vazio;  
 $W$  - peso da carga ( $t/m^2$ );  
 $r$  - densidade ( $kg/m^3$ );  
 $\vec{F}_s^i$  - transferência de momento entre sólidos e líquidos (N);  
 $\vec{U}_i$  - vetor de velocidade de entrada (m/s);  
 $\vec{U}_s$  - vetor de velocidade de saída (m/s);  
 $\beta$  - coeficiente de arraste hidrodinâmico (-);  
 $\varepsilon$  - fração de vazios do leito, dentro do cadinho (-);  
 $\phi$  - variável, temperatura ou velocidade, resolvida pelo modelo (-);  
 $\mu$  - viscosidade da escória (Poise);  
 $\Gamma_\phi$  - coeficiente de transferência da variável (-);  
 $\rho_C$  - densidade do coque ( $kg/m^3$ );  
 $\rho_{HM}$  - densidade do metal ( $kg/m^3$ );  
 $\rho_i$  - densidade da fase ( $kg/m^3$ );  
 $\phi_s$  - fator de forma do sólido (-);  
 $\sigma$  - molhabilidade (N/m);  
 $\rho$  - densidade da escória ( $kg/m^3$ );  
 $\rho_M$  - densidade do ferro-gusa ( $t/m^3$ );  
 $\psi$  - esfericidade das partículas de combustível no cadinho (-).

## RESUMO

O escoamento de gusa e escória no interior do cadinho tem importante função na zona inferior do alto-forno. Esse fenômeno envolve o transporte de massa e energia, e afeta a distribuição do fluxo gasoso. Em geral, esses líquidos sofrem transformações físicas e químicas, e são redistribuídos radialmente, durante a passagem pelo homem morto na descida para o cadinho. Na operação do alto-forno são comuns flutuações em seu comportamento, acompanhando os ciclos de vazamento de gusa e escória. O acúmulo de líquidos no cadinho e sua influência sobre a descida da carga é a principal causa dessas flutuações.

O fluxo de líquidos no cadinho do alto-forno pode ser caracterizado usando-se equações gerais de conservação de massa e energia. Sabe-se que ele é fortemente influenciado pela fração de vazios no interior do reator, pelo fluxo de gás nas vizinhanças do *raceway* e pelo perfil do alto-forno. O fluxo de escória altera mais as condições operacionais quando comparado ao de gusa.

Assim, neste trabalho, foi feita uma abordagem sobre a movimentação do líquido no interior do cadinho do Alto-Forno 3 da Usiminas. Este estudo englobou o desenvolvimento de um balanço de forças que permite avaliar a flutuação do homem morto no cadinho, baseado nas características do alto-forno e em suas condições operacionais. Juntamente com novas rotinas de cálculo, esse resultado é então utilizado para alimentar o modelo matemático de fluxo de líquidos, previamente desenvolvido.

Dos resultados alcançados, pode-se concluir que a determinação da distância entre o fundo do cadinho e o início da coluna de coque está intimamente ligada à variação de pressão de sopro e de topo e ao peso da carga no alto-forno; a movimentação do líquido no cadinho é muito influenciada pela situação de flutuação do homem morto; a variação homogênea da granulometria do coque não influencia de forma significativa a distribuição dos líquidos nem o tempo de residência. No entanto, a distribuição granulométrica do coque ao longo do raio no interior do cadinho tem forte influência nas linhas de fluxo do líquido, e conseqüentemente, na sua retenção.

**Palavras-chave:** alto-forno, cadinho, drenagem, modelagem.

## ABSTRACT

Molten iron and slag flow play a critical role in the blast furnace lower zone, transporting mass and energy, whilst impairing and redistributing gas flow. In turn, molten iron and slag undergo physical and chemical changes, and are redistributed radially while it is descent to the hearth. At the blast furnace operation is common fluctuation, accompanying the cycles of iron and slag leak. The liquids accumulation into the hearth and its influence on the descent of the load is the main cause of that fluctuation. It is possible to observe that there is an increase in the blow pressure during the period among twice leaks, and the pressure decrease only along the tapping.

Using the conservation flux and energy equation, the liquids flow inside the blast furnace can be characterised. It is strongly influenced by the radial variation in void fraction entering the furnace, gas flow in the vicinity of the *raceway* and the furnace profile. The slag flow is more sensitive to operating conditions than molten iron.

In this paper, it was made an discussion about the liquid movement inside the hearth of Usiminas Blast-Funace 3. This study included a mathematical model development using a balance of forces that allows to evaluate the dead man's flotation, based on the characteristics of the blast furnace and in its operational conditions. Also, with new calculation routines, that result is used then to feed the mathematical model of liquids flow, previously developed.

The results indicate that the drainage behaviour and residual iron and slag volume are affected by the conditions inside the hearth; the determination of the dead man fluctuation is linked to the variation of the blow and top pressure. In addition, the weight of the burden in the blast furnace have a great influence too; the movement of the liquid inside a hearth is very influenced by the situation of the dead man's flotation; the homogeneous variation of the coke granulometry has no strongly influence in the distribution of the liquids, ether in the residence time. However, the particle size distribution of the coke along the radio inside the hearth has strong influence in the liquid flow lines, and consequently, in its retention.

**Key words:** blast furnace, hearth, drainage, modelling.

## 1 INTRODUÇÃO

Visando uma produção econômica de ferro-gusa, via altos-fornos, é importante a garantia de uma longa campanha desses reatores, aliada a uma boa estabilidade operacional. Nesse sentido, buscando melhor entendimento e suporte à implementação de melhorias ao controle do processo de alto-forno, esforços têm sido direcionados para o desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de descrever o estado interno desse reator. Em função da complexidade do processo de produção de gusa são envolvidos no desenvolvimento destes modelos balanços de massa e de energia, além de equações de cinética química e de transporte de calor e massa.

É fundamental que se tenha um cuidado especial com o cadinho, parte que define a vida útil do equipamento. Além disso, melhor estabilidade e eficiência da operação do forno é obtida quando se consegue uma melhor drenagem de gusa e escória, sendo para isto, necessária uma adequada permeabilidade na região do homem morto<sup>(1)</sup>. Assim, na busca de fornecer melhores ferramentas de controle ao operador, diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos sobre os fenômenos no interior do cadinho, com ênfase em diferentes aspectos tais como fluxo de líquidos, transferência de energia, qualidade do coque, fração de vazios, estado do homem morto, perfuração e estado do furo de corrida além de trabalhos que envolvem modelos do alto-forno como um todo.

No entanto, a grande maioria dos trabalhos acima citados aborda a influência da movimentação de líquidos no desgaste da parede do reator, enquanto que os fenômenos que influenciam na drenagem do material líquido ainda são pouco modelados. Desta forma, dentre os modelos a serem desenvolvidos, o que apresenta um grande potencial de aplicabilidade às práticas operacionais é o modelo matemático (simulação numérica) do fluxo de metal líquido no cadinho para descrever o escoamento de gusa e escória durante a corrida. Contudo, vale ressaltar limitações no modelo devido à hipóteses e simplificações necessárias para permitir a solução<sup>(2)</sup>.

No processo de redução em alto-forno, o vazamento de gusa e escória é feito de maneira praticamente contínua, alternando-se apenas os furos de corrida. Desta forma, um alto-forno que trabalha com um número reduzido de corridas, como é o caso do alto-forno 3 (AF3) da Usiminas, exige maior atenção para os problemas de fluxo e esgotamento do cadinho. Observa-se que o acúmulo excessivo de gusa e escória, decorrente de atraso na

perfuração, má qualidade do coque, flutuações térmicas do forno e má qualidade da massa de tamponamento, provoca um aumento da pressão de sopro, descida irregular de carga, dentre outros<sup>(3,4)</sup>. Além disso, as flutuações do nível de líquido podem, também, provocar um efeito prejudicial na estabilidade do reator.

Nesse contexto, o presente estudo apresenta a adaptação de um modelo matemático do fluxo de metal líquido no cadinho, desenvolvido originalmente pelo professor Dr. José Adilson de Castro (UFF), para ser utilizado na avaliação da movimentação do líquido no interior dos altos-fornos. Considerando que uma maior produtividade do forno implica numa maior necessidade de controle do seu esgotamento, optou-se pela adequação desse modelo para o AF3 da Usiminas. Além disso, os resultados podem nortear ações a serem tomadas para todos os altos-fornos, uma vez que reafirmam conceitos e fundamentos da operação do reator. As principais variáveis consideradas no modelo são: a vazão do líquido, o nível térmico do cadinho, a fração de vazios, a produção de gusa e a sua velocidade de movimentação no interior do cadinho.

## **2 OBJETIVO**

### **Geral**

Possibilitar, por meio de modelagem matemática, um melhor conhecimento e entendimento da movimentação dos líquidos no interior do cadinho de alto-forno.

### **Específico**

Adequar e implementar um modelo matemático do fluxo de materiais líquidos no cadinho ao AF3 da Usiminas.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Aspectos Internos do Alto-Forno

Um dos grandes avanços no conhecimento do estado interno dos altos-fornos ocorreu com as experiências de dissecação deste equipamento realizadas pelos russos e japoneses<sup>(5)</sup>. Estas experiências indicaram a existência de cinco zonas distintas dentro dos fornos, (figura 3.1):

- a) zona granular - região localizada na parte superior do forno e formada por camadas alternadas de combustível/redutor (coque ou carvão vegetal) e carga metálica (minério granulado, sinter e pelota), cuja configuração é mantida mais ou menos inalterada ao longo do forno;
- b) zona de amolecimento e fusão ou zona coesiva - região constituída de camadas de combustível/redutor e de carga metálica semi-fundida;
- c) zona de coque ativo - região composta por um leito de combustível/redutor, através do qual escoam, em sentido descendente, metal e escória líquidos provenientes da zona coesiva, e em sentido ascendente, os gases provenientes da região das ventaneiras. O combustível presente nesta região é continuamente consumido;
- d) zona de combustão (*raceway*) - consiste de uma cavidade formada em frente às ventaneiras. Nessa região ocorre a queima do combustível com o ar quente injetado;
- e) zona de coque estagnante - composta por uma coluna de coque, em contato com ferro-gusa e escória líquidos (homem morto). O combustível dessa região é consumido muito lentamente, através da dissolução do carbono no ferro líquido.

A produtividade e o consumo de combustível no alto-forno dependem do comportamento dos gases ao atravessar essas diferentes regiões. A variação da pressão do gás à medida que ele sobe no interior do reator apresenta perfil característico. Cerca de 60% da queda de pressão total ocorre quando o gás atravessa a zona de amolecimento e fusão. Desse modo, é possível um aumento da produtividade atuando na permeabilidade desta região<sup>(5)</sup>.

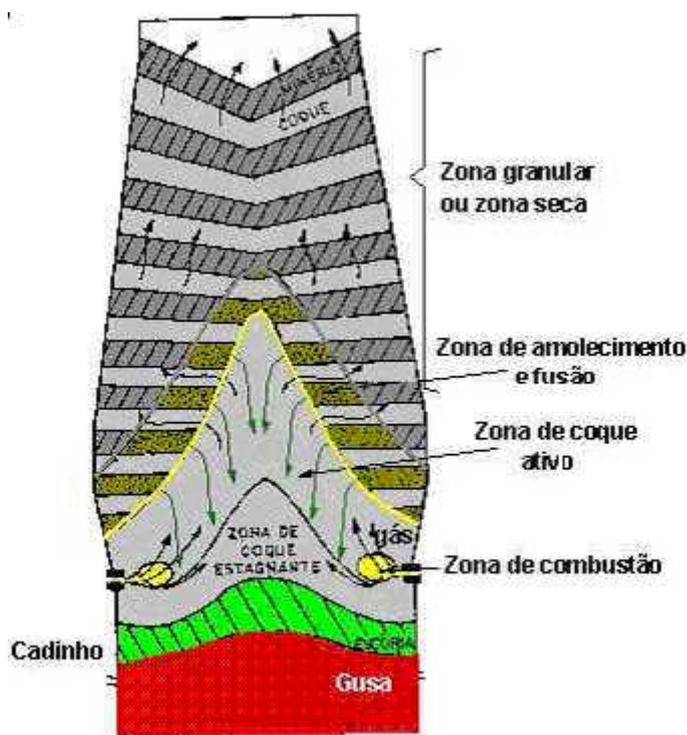


Figura 3.1 – Regiões do alto-forno<sup>(5)</sup>.

### 3.2 Funcionamento do Alto-Forno

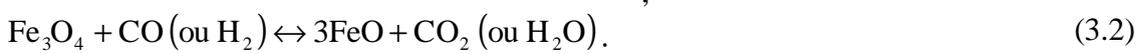
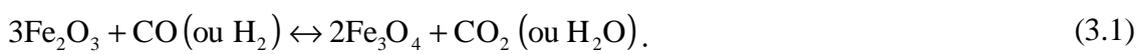
O alto-forno é, do ponto de vista físico-químico, além de um grande trocador de calor em contracorrente, um complexo reator químico, envolvendo fases sólidas, líquidas e gasosas. Os gases quentes ascendentes trocam calor e reduzem as camadas de carga metálica que se deslocam no sentido contrário<sup>(6)</sup>.

O ar preaquecido, a temperaturas da ordem de 1200°C, é soprado pelas ventaneiras do alto-forno e entra em contato com o coque no *raceway*. O contato do oxigênio do ar com o carbono do coque aquecido, a cerca de 1500°C, provoca inicialmente a reação de formação do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Essa reação, altamente exotérmica, produz grande quantidade de calor para o processo. O dióxido de carbono reage instantaneamente com o carbono do coque formando monóxido de carbono (CO), segundo a reação de *solution loss* ou Boudouard ( $C_{(s)} + CO_{2(g)} \leftrightarrow 2CO_{(g)}$ ), endotérmica. A umidade (H<sub>2</sub>O) contida no ar soprado reage com o carbono do coque, gerando os gases redutores CO e H<sub>2</sub>. Embora essa reação também seja endotérmica, como o volume

global de H<sub>2</sub>O no ar soprado é baixo, o resultado efetivo associado à saída dos gases redutores do *raceway* é o aporte de grandes quantidades de calor para a seqüência do processo, gerando temperaturas de chama superiores a 2000°C. Durante o restante do seu trajeto no forno, o gás ascendente suprirá calor para as camadas de carga metálica descendentes, deixando o topo do forno com temperaturas da ordem de 100°C.

Devido às necessidades diferenciadas de calor para uma série de reações químicas que ocorrem em vários níveis do forno, o perfil de temperaturas assume uma forma característica: uma zona superior de preaquecimento (20°C a 800°C) separada de uma zona inferior de fusão (1000°C a 1500°C), por uma zona vertical de reserva térmica, na qual ocorre pouca troca de calor entre gás e sólidos, chegando a ocupar 40% a 50% da altura total do forno<sup>(6)</sup>.

A natureza do processo de contracorrente permite que um gás altamente redutor (teor elevado de CO) entre em contato com a *wustita*, que apresenta o menor potencial de oxigênio dos três óxidos de ferro, e, posteriormente, faz com que a magnetita e hematita sejam reduzidas, na zona superior, por um gás de menor potencial redutor. Sendo o CO<sub>2</sub> o produto final da combustão do carbono, a utilização das energias térmica e química deste elemento químico será tão mais completa quanto maior for a quantidade de oxigênio removida pelas reações mostradas nas equações 3.1 a 3.3. Essas reações são chamadas de redução indireta, sendo a reação global medianamente exotérmica. Se alguma *wustita* permanece não reduzida, ela é posteriormente reduzida por redução direta na região onde as temperaturas excedem a 1000°C, equação 3.4.



### 3.3 Furos de Corrida de Altos-Fornos

Os furos de corrida, também chamados furos de gusa, situam-se na parede do cadinho, possuindo uma estrutura de revestimento refratário totalmente independente. Gusa líquido e escória são juntamente retirados pelo furo de corrida, que é tamponado ao final do vazamento utilizando-se massa refratária.

Os grandes altos-fornos, na maioria das vezes, operam com dois furos de corrida, sendo que um é aberto logo após o outro ter sido tampado. Desta forma, no início da corrida é pouca a quantidade de gusa no interior do cadinho, desde que o forno esteja bem esgotado. Além disso, o diâmetro do furo é pequeno, praticamente igual ao diâmetro da broca utilizada em sua abertura. Assim, a vazão de saída é menor que a taxa com que o gusa e escória são produzidos pelo alto-forno. Conseqüentemente, as quantidades de gusa e escória no cadinho aumentam em um dado intervalo de tempo. No entanto, com o aumento do diâmetro do furo e da coluna de gusa e escória no cadinho, a vazão de saída excede a taxa de produção possibilitando o esgotamento do forno e provocando escape de gases, ou seja, o final da corrida, quando então o furo deve ser fechado<sup>(7)</sup>. A partir destas considerações prevê-se que:

- ◆ um alargamento do furo acima do normal resulta em aumento da vazão com conseqüente tamponamento prematuro. Este fenômeno ocorre devido a pequena diferença no nível entre o furo de corrida e o nível de gusa no cadinho;
- ◆ para furos muito longos, com pequenos diâmetros, o gusa e a escória separam-se em duas camadas. Nesse caso, o gusa é vazado primeiro e apenas quando a camada de escória se torna muito espessa ela é vazada.

Estratégias especiais de corrida devem ser adaptadas de acordo com o estado do forno, em busca de se produzir uma consistente e suficiente drenagem do cadinho. Em diversos altos-fornos regras simples são aplicadas para procedimento de corridas baseado em critérios como tempo entre corridas e tempo de aparecimento de escória. Na maioria das vezes, essas regras são efetivas durante operação normal. Entretanto, em períodos com distúrbios no processo (como excessivo acúmulo de escória) o procedimento de corrida deve ser mudado de acordo com o real nível de líquido no cadinho. Também um aumento na produtividade do alto-forno e otimização no procedimento de corridas (por exemplo a redução do número de corridas por dia) requerem informações mais detalhadas do nível de líquidos no cadinho<sup>(8)</sup>.

Baseado nessas informações, entende-se o importante papel de se controlar o furo de gusa e, em conseqüência, de se manter a vazão na drenagem do cadinho.

### 3.4 Nível de Líquidos no Cadinho e seus Efeitos

O cadinho é parte extremamente importante na operação do alto-forno, uma vez que é nessa região onde o produto, gusa, assume sua temperatura e composição final. Essa parte do forno, onde o líquido é coletado e por onde ocorre a saída dos líquidos, é a que define a campanha e a estabilidade operacional do reator.

É importante destacar que os fenômenos de transporte e a situação física do cadinho são complicadas e de difícil caracterização e monitoramento. A heterogeneidade do fluxo, a transferência de energia, e a dissolução de carbono do refratário e do coque causam enormes diferenças nas condições térmicas e na composição do gusa<sup>(2)</sup>.

É imperativo que o interior do cadinho tenha suficiente volume e permeabilidade para manter uma drenagem sem distúrbios e uma corrida controlada. Dependendo das condições do homem morto, isto é, se está assentado ou flutuando, ocorrem mudanças nas condições físicas e térmicas do cadinho, afetando o desgaste refratário. Além disso, a situação do núcleo do forno é muito importante para a qualidade do gusa<sup>(9)</sup>.

A produção de ferro-gusa e escória é contínua, enquanto que a retirada, em alguns casos, é feita em intervalos, ocorrendo, portanto, acúmulo de materiais no cadinho. Conforme já foi mencionado, o estado do cadinho afeta a distribuição dos elementos químicos (Si, S, Mn, Ti) entre gusa e escória e também a carbonização do ferro. O esgotamento do cadinho é um fator especialmente crítico se a produtividade do forno é aumentada<sup>(5)</sup>. Desta forma, o controle da drenagem se torna de grande importância uma vez que um cadinho com baixo nível de líquidos é essencial para a boa operação do forno<sup>(5,10)</sup>.

Durante uma operação de corrida, existe uma tendência geral de se ter maior esgotamento do gusa em relação à escória. Isto pode ser explicado em função da menor viscosidade do gusa<sup>(10)</sup>.

Os estudos consultados sobre esse assunto dividem-se principalmente em:

- ◆ experiências realizadas em modelos a frio, em 2 ou 3 dimensões, procurando simular o vazamento de uma fase líquida<sup>(11-14)</sup>;

- ◆ equacionamento dos resultados obtidos dos modelos em conjunto com balanços de massa<sup>(1,11,15-18)</sup>;
- ◆ experiências em escala industrial utilizando traçadores radioativos<sup>(12,19)</sup>;
- ◆ modelagem matemática, baseada nas equações de Navier-Stokes e Ergun<sup>(18,20-23)</sup>.

É consenso que algumas flutuações no comportamento do alto-forno podem ser explicadas pelo acúmulo de líquidos no cadinho. Esse acúmulo exerce influência sobre a descida da carga, e é possível observar que há um aumento na pressão de sopro durante o período entre dois vazamentos, sendo que a pressão cai ao longo da corrida, (figura 3.2). Ou seja, esse acréscimo na pressão de sopro é decorrente do acúmulo de líquidos no cadinho, que faz com que o nível de escória aumente e, na parte central do forno, atinja alturas superiores ao nível das ventaneiras. Oscilações de pressão de até 0,2 atm já foram observadas em alguns altos-fornos<sup>(5)</sup>.

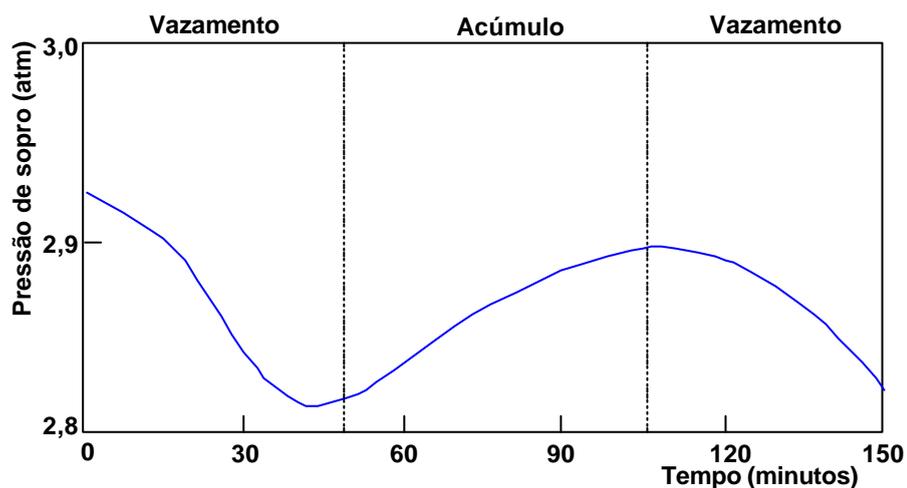


Figura 3.2 – Variação na pressão de sopro do ar em função do ciclo de vazamento de gusa e escória, segundo Kitaev *et al.*, citada por Figueira *et al.*<sup>(5)</sup>.

No caso do reator onde se obteve os resultados indicados na figura 3.2, o dispositivo de sopro do ar permite manter a sua vazão constante através de variações na pressão. Quando não se tem esse recurso, geralmente ocorre uma redução na vazão de ar devido ao acúmulo de líquidos no cadinho, (figura 3.3)<sup>(5)</sup>.

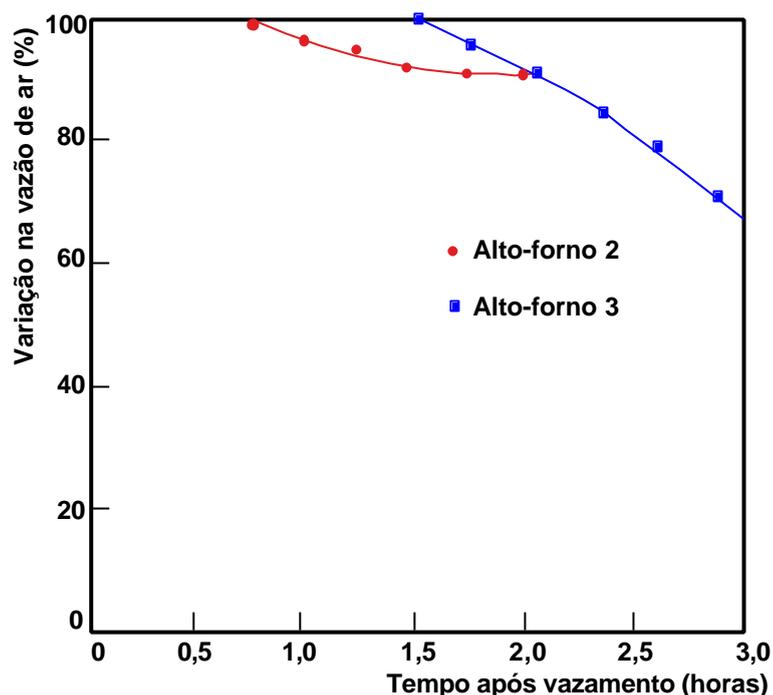
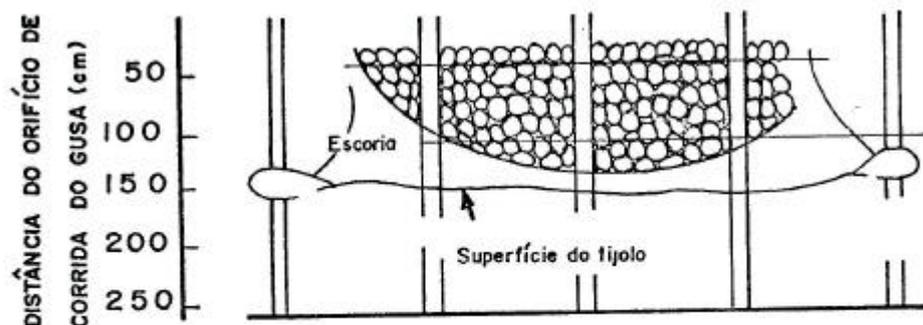
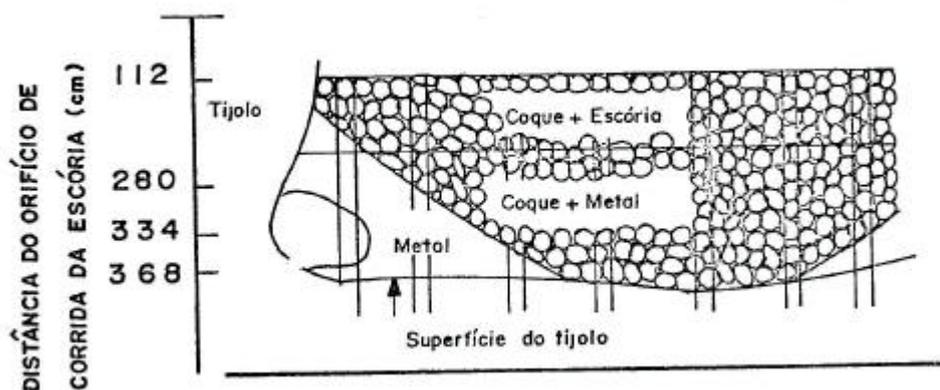


Figura 3.3 – Variação na vazão de ar em função do tempo após o vazamento de gusa e escória, altos-fornos de Port Kembla, segundo Wagner, citado por Figueira *et al.*<sup>(5)</sup>.

Além dos importantes efeitos sobre a pressão de sopro e a vazão de ar, o nível de líquidos no cadinho afeta também o estado do núcleo do reator. Juntamente com as próprias características dos materiais líquidos, o homem morto, que recebeu esse nome devido ao longo período de residência do coque dentro do alto-forno, é responsável pela permeabilidade/movimentação do fluxo no interior do cadinho. Sua flutuação ou não depende do equilíbrio de forças entre empuxo (o coque é muito mais leve que o metal) e o peso da carga<sup>(24)</sup>. Na análise das seções de dois altos-fornos dissecados, (figura 3.4), pode-se observar que em um dos fornos o homem morto está flutuando (a) enquanto que no outro ele está apoiado no fundo do cadinho (b).



(a) homem morto flutuando



(b) homem morto assentado

Figura 3.4 – Seção vertical do cadinho com posições distintas do homem morto, AF5 – Higashida (a) e AF4 – Kukioka (b), segundo Kanbara *et al.*, citado por Figueira *et al.*<sup>(5)</sup>.

Como indicado anteriormente, a posição do homem morto é função do balanço de forças atuando nele, (figura 3.5). A penetração do leito de combustível na escória e no gusa é determinada pelo peso da carga sólida e pelas forças de empuxo de gás e líquidos. O peso da carga sólida aumenta com a altura do leito de partículas e com o aumento da carga metálica em relação ao combustível. A força de empuxo dos líquidos aumenta com a penetração do combustível nas camadas de escória e gusa.

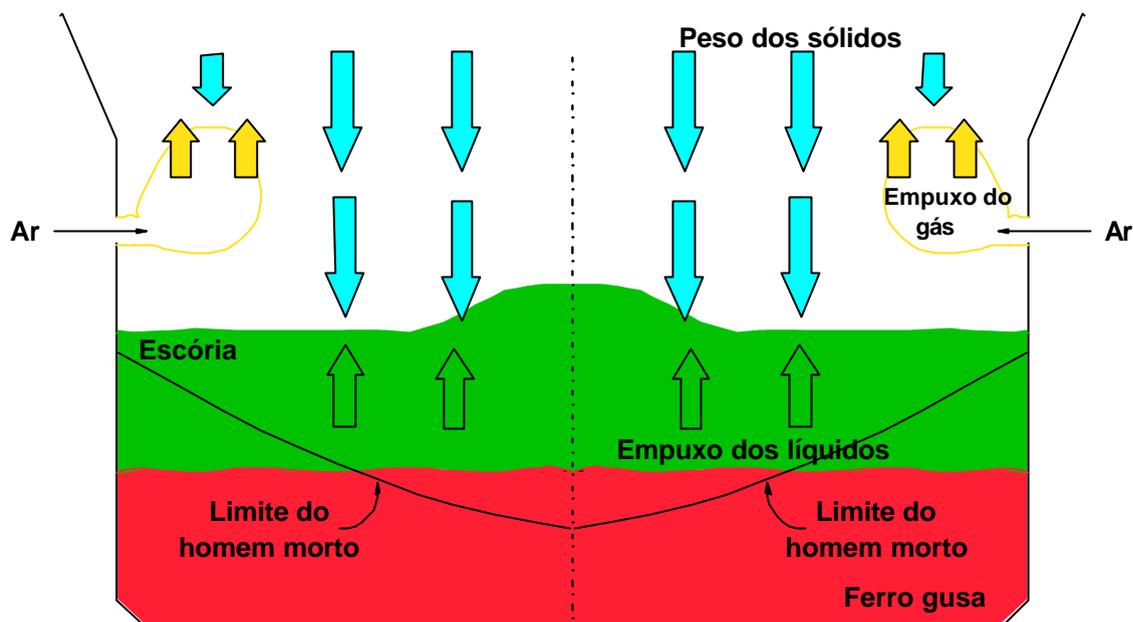


Figura 3.5 – Vista esquemática das forças atuantes no cadinho de um alto-forno e que determinam a posição do homem morto<sup>(5)</sup>.

Quanto maior for o nível de líquidos no cadinho, mais alta é a possibilidade do homem morto flutuar. Assim sendo, as condições de drenagem do cadinho afetam também o estado do homem morto<sup>(5,25)</sup>.

Havelange *et al.*<sup>(24)</sup> desenvolveram um equipamento para avaliar a localização do homem morto, baseado na diferença de pressão do sopro de nitrogênio pelo furo de gusa. A fórmula utilizada para determinação da fração livre no interior do cadinho leva em consideração a variação da pressão ao longo do tempo, além de outros parâmetros.

A equação 3.5 representa o equilíbrio de forças aplicadas no homem morto na interface escória/gás<sup>(24)</sup>.

$$W = (r_{HM} - r_C)(1 - e)H_{HM} + (e_{SL} - e_C)(1 - e)H_{SL} \quad (3.5)$$

$$e = \frac{0,0981 * G * \left( \frac{1 + SR}{1000} \right)}{A * \frac{dP}{dt}} \quad (3.6)$$

Em que,

$\varepsilon$  - fração de vazios do leito, dentro do cadinho (-);

$dP/dt$  - variação da pressão (bar/h);

$G$  - produção, obtida pelo balanço de oxigênio (t/d);

$A$  - área do cadinho (m<sup>2</sup>);

SR - *slag-rate* (kg/t);

$V_{HM}$  - volume de metal presente no cadinho ( $m^3$ );

$H_{HM}$  - espessura da camada de metal, com coque (m);

$H_{SL}$  - espessura da camada de escória, com coque (m);

W - peso da carga ( $t/m^2$ );

$\rho_{HM}$  - densidade do metal ( $kg/m^3$ );

$\rho_C$  - densidade do coque ( $kg/m^3$ ).

Nesse mesmo estudo<sup>(24)</sup> foi avaliada a relação existente entre a fração de vazios estimada no cadinho e a qualidade do coque (I40 – teste de tamboreamento), (figura 3.6).

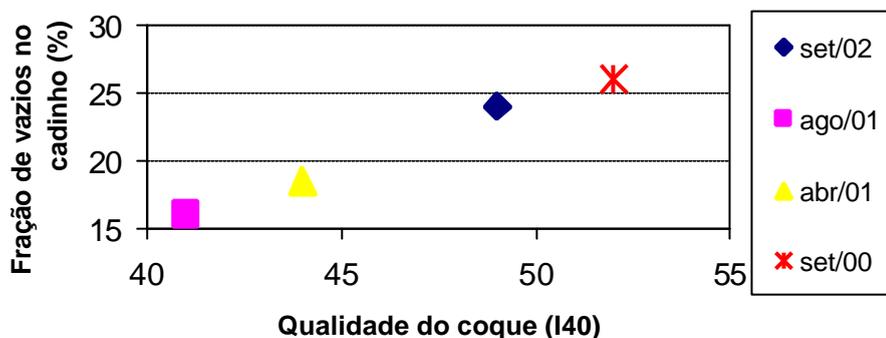


Figura 3.6 – Fração de vazios no cadinho em função da qualidade do coque<sup>(24)</sup>.

Para acompanhar o nível de líquidos é usualmente definido um parâmetro denominado índice de enchimento do cadinho, que mede a fração do volume do cadinho ocupada pelo acúmulo de escória e metal durante o tempo entre o final de um vazamento e o início da próxima corrida. Esse parâmetro pode ser avaliado através da relação dada pela equação 3.7.

$$E_c = \frac{Q_p \cdot T_a}{V_c} \quad (3.7)$$

Em que,

$E_c$  - índice de enchimento do cadinho (-);

$Q_p$  - taxa de produção de gusa e escória, expressa em termos de volume destes dois materiais ( $m^3/min$ );

$T_a$  - período de acumulação: tempo entre o final de um vazamento e o início da próxima corrida (min);

$V_c$  - volume do cadinho [volume da região entre as ventaneiras e o furo de corrida] ( $m^3$ ).

Segundo Fukutake e Okabe<sup>(10)</sup>, considerando o cadinho totalmente preenchido com o leito de combustível sólido, o índice máximo de enchimento do cadinho que assegure uma operação normal do alto-forno pode ser calculado de acordo com as seguintes suposições:

- ◆ o máximo volume de líquido corresponde a um nível equivalente a 80% da altura entre as ventaneiras e o furo de corrida;
- ◆ o volume de escória retida após o vazamento corresponde a 50% do volume efetivo do cadinho;
- ◆ a fração de vazios efetiva do leito de combustível é de 0,3.

A partir das considerações acima e aplicando-se os valores na equação 3.7, pode-se estimar o máximo índice de enchimento do cadinho,  $E_{C_{máx}} = 0,12$ , ou seja, se o volume de gusa e escória ultrapassar 12% do volume útil do cadinho, começarão ocorrer problemas de elevação na pressão de sopro ou redução na vazão de ar.

O valor do índice máximo de enchimento do cadinho ( $E_{C_{máx}}$ ) avaliado anteriormente pode ser útil na estimativa do tempo máximo de acumulação de líquidos entre um vazamento e outro que se pode ter sem perturbação da operação normal do forno.

Na prática, ao avaliar a saída de material do cadinho, pode-se observar que o fluxo de líquidos apresenta um perfil diferenciado para a situação de cadinho bem ou mal esgotado. Existe uma larga variação na duração da corrida, e na demora de saída de escória. Geralmente, a corrida se inicia com apenas gusa, e se estabiliza relativamente rápido. O início de saída de escória, com evolução similar ao do gusa, varia entre 0 min e 90 min, sendo que a média gira em torno de 23 min<sup>(1)</sup>. Em algumas corridas, o decréscimo no fluxo é simultâneo entre gusa e escória. Isso é causado possivelmente por partículas de coque que bloqueiam o furo de corrida. Na grande maioria das vezes, o tempo médio total das corridas é de aproximadamente 180 min, sendo que este valor ainda varia em função das condições operacionais de cada alto-forno.

Quando se inicia o fluxo de escória, não se observa decréscimo no fluxo de gusa. Uma possível explicação para esse fato pode ser a rápida erosão da parede causada pela escória, que é quimicamente mais agressiva ao refratário quando comparada ao gusa.

A quantidade exata de escória no interior do alto-forno ao final de corrida é um problema que necessita estudo e dedicação. Hoje, o furo de corrida é fechado quando o fluxo de gás atravessa o furo, o que é considerado uma decisão subjetiva. Além disso, a passagem de gás é prejudicial ao processo devido à erosão no furo de gusa e ao elevado risco operacional. Então, o instante em que a corrida se encerra, é por si só, impreciso.

Com relação à movimentação do fluido no interior do cadinho, resultados obtidos em experiências com modelos físicos<sup>(11-13)</sup> mostraram que:

- ◆ em um cadinho completamente preenchido com um leito de coque, o fluxo de gusa é lento e a espessura da camada estagnada (gusa semi-solidificado que protege a parede do cadinho) tende a aumentar;
- ◆ a ocorrência de uma camada sem coque de pequena espessura provoca um fluxo rápido de metal através dela e, conseqüentemente, a fusão gradativa da camada estagnada. Por outro lado, se a camada sem coque for espessa, o fluxo é lento e minimiza a erosão;
- ◆ a formação e fusão da camada estagnada provocam uma flutuação da carga térmica no fundo do cadinho promovendo desgaste no revestimento.

Portanto, segundo a literatura consultada, a existência de uma camada fina sem coque sob o homem morto provoca um fluxo de gusa através dela a uma velocidade cerca de 20 vezes superior à do cadinho contendo uma coluna de coque granulado apoiada no fundo<sup>(23,26)</sup>.

### **3.5 Modelagem do Fluxo de Líquidos no Cadinho**

#### **3.5.1 Considerações Gerais da Modelagem Física**

Desde a década de 70, diversos modelos bi e tridimensionais vêm sendo desenvolvidos no intuito de identificar o escoamento do líquido em meio poroso dentro do cadinho do alto-forno<sup>(9)</sup>. Até o início da década de 80, o elemento de estudo mais importante era a drenagem efetiva da escória<sup>(27)</sup>. Em 1981, Fukutake *et al.*<sup>(10)</sup>, estudando sobre o fluxo de escória no cadinho, identificaram que o coeficiente de saída de escória está diretamente relacionado com a sua viscosidade, com a taxa de vazamento e com a permeabilidade

do coque. Eles mostraram que para se obter pouco residual de escória no cadinho, a viscosidade e a taxa de vazamento devem ser baixas enquanto que a permeabilidade do leito de coque deve ser elevada. Em 1982, Tanzil *et al.*<sup>(28)</sup> observaram, em seu modelo físico, a posição da interface entre os dois fluidos (escória e gusa) acima e abaixo do furo de gusa ao final da corrida. Desta forma, esses pesquisadores demonstraram que o gusa pode fluir de regiões inferiores ao furo de corrida para fora do cadinho. A curvatura da interface gás-escória e escória-gusa depende da situação do cadinho tanto quanto das condições de vazamento. Segundo Chen *et al.*<sup>(29)</sup>, em 1985, Fukutake, em experimentos utilizando modelos bidimensionais, observou caminhos preferenciais do fluido até o furo de gusa. Segundo ele, o líquido vai primeiramente para baixo na região livre de coque, e posteriormente sobe para o furo de gusa. Em 1985, Peters *et al.*<sup>(8)</sup> estudaram o efeito da estrutura do homem morto no fluido dentro do cadinho usando um simulador bidimensional. Foi investigado o efeito da forma da base do homem morto e sua localização (assentado ou flutuando). Em termos de perfil do fluido, não foi noticiada diferença ao simular forma convexa ou linear da base do homem morto, mantendo-se as demais condições constantes. Em 1996, Suh *et al.*<sup>(12)</sup> divulgaram estudos realizados em modelos a água. Eles reportaram que o tempo de residência do líquido aumenta com a diminuição do tamanho do coque e diminui com o aumento da taxa de vazamento. Quando o *small* coque foi colocado no centro do leito, o fluxo periférico aumentou. Além disso, afirmou que o tempo de residência do fluido na periferia é menor que na região central, e o fato de o homem morto estar flutuando ou assentado implica num comportamento diferente para o fluido. Em 2003, Nouchi *et al.*<sup>(30)</sup> examinaram o efeito do espaço livre de partículas na eficiência de drenagem do cadinho, utilizando dois fluidos imiscíveis. Eles reportaram que uma zona sem coque em frente ao furo de gusa muda drasticamente o volume de escória residual no cadinho. Entretanto, o efeito de outras condições internas do forno, por exemplo, viscosidade da escória, densidade de gusa e escória não foi examinado devido às limitações das propriedades dos líquidos que poderiam ser utilizados no experimento. Eles divulgaram resultados de um modelo cilíndrico tridimensional. Quando o modelo foi totalmente preenchido com partículas, a água fluiu diretamente para o furo através do leito. No entanto, quando o leito foi parcialmente assentado no centro e foi formada uma zona livre próxima à parede, a água fluiu primeiramente para baixo e posteriormente entrou

na zona livre de partículas. Então, foi formado um intenso fluxo circunferencial na zona livre de coque, em direção ao furo de corrida. Esse fenômeno pode resultar em elevado desgaste térmico e mecânico na parede e fundo do cadinho. Também segundo Chen *et al.*<sup>(29)</sup>, em 2004, Nnanna divulgou resultados de estudos realizados em modelo tridimensional de cadinho. O homem morto foi considerado como sendo uma região circundada por líquido. As simulações foram realizadas variando a fração de vazios de 0 a 0,3 e o homem morto assentado na região central do cadinho. Observou-se que para diferentes alturas do furo de gusa, a velocidade máxima do fluido sempre foi na área próxima à saída.

Além disso, Tanzil *et al.*<sup>(13)</sup> em 2004, baseado em experimentos físicos, no balanço de massa e em modelos matemáticos que descreviam o movimento da interface gás/escória, desenvolveram técnicas que possibilitassem melhor desempenho da corrida. Seus resultados afirmam que as condições do cadinho, próximo ao furo de gusa, determinam o residual de escória, desde que o gradiente de pressão seja elevado e determine a inclinação da interface gás/escória. Através de seu modelo, foi possível determinar o tempo de duração da corrida, no entanto, o nível de escória só pode ser determinado quando o modelo estiver efetivamente implementado no controle de processo. Contrariamente ao que diz Takatani<sup>(23)</sup>, Tanzil sugere que existe influência da forma de entrada do fluido que chega ao cadinho na quantidade residual de escória.

Torrkulla *et al.*<sup>(14,31)</sup> afirmaram que, devido a um grande progresso na operação dos altos-fornos, parte das informações obtidas através da dissecação já estão obsoletas. Atualmente, esses reatores trabalham com elevada produtividade e baixo consumo de combustível. Quando do aumento da produtividade, não se deve esquecer que, caso não haja melhora na qualidade do coque, ou seja, o cadinho esteja impermeável, esse aumento pode levar a problemas com residual de gusa e escória, enquanto que, por outro lado, a passagem por formação de canais em torno do homem morto, podem causar acentuado aumento na erosão do cadinho.

Baseado em resultados desses modelos, serão apresentados comentários sobre o escoamento da escória e do gusa, dependendo das condições de operação do alto-forno e do cadinho.

### 3.5.2 Escoamento da Escória

Antes de analisar os parâmetros que afetam a remoção da escória, é interessante observar como varia o seu nível ao longo do raio do alto-forno.

Para uma dada vazão de gás saindo da zona de combustão, o formato da superfície de escória varia em função do nível médio de líquidos, em metros, no cadinho, (figura 3.7). Nível médio negativo significa que ele está abaixo da altura das ventaneiras<sup>(5,11,16,32)</sup>.

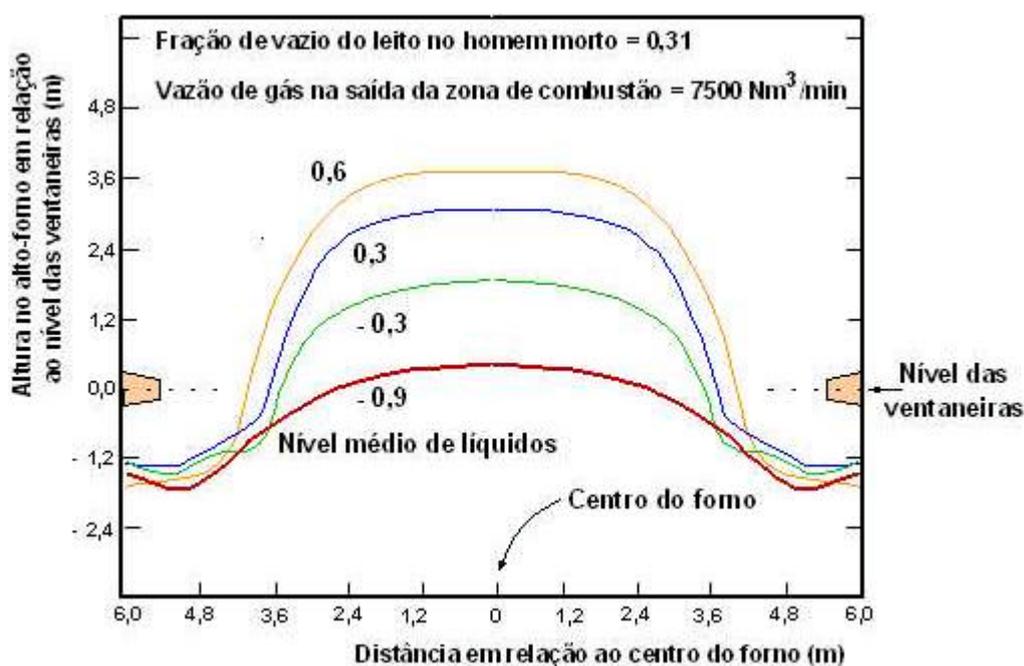


Figura 3.7 – Efeito do nível médio de líquido no cadinho sobre o formato da superfície de escória, segundo Hatano *et al.*, citado por Figueira *et al.*<sup>(5)</sup>.

A observação dessa figura permite os seguintes comentários:

- ◆ o nível de escória varia ao longo do raio do forno, sendo mais elevado na região central, onde atinge alturas superiores à das ventaneiras;
- ◆ a altura da escória junto à parede do forno não varia muito com o nível médio de líquidos no cadinho;
- ◆ a altura da escória na região central do forno cresce com o aumento do nível médio de líquidos no cadinho. Essa elevação do nível de escória na parte central é que causa necessidade de aumento na pressão de sopro ou diminuição no volume de ar soprado.

Mantendo-se fixa a altura média de líquidos no cadinho, é possível observar o efeito da

vazão de gás que sai da zona de combustão sobre os níveis de escória ao longo do raio do alto-forno, (figura 3.8). Podem-se destacar os seguintes pontos<sup>(5)</sup>:

- ◆ a altura da escória na região central cresce com o aumento da vazão de gás na zona de combustão;
- ◆ a altura da escória junto à parede aumenta com a diminuição da vazão de gás da zona de combustão.

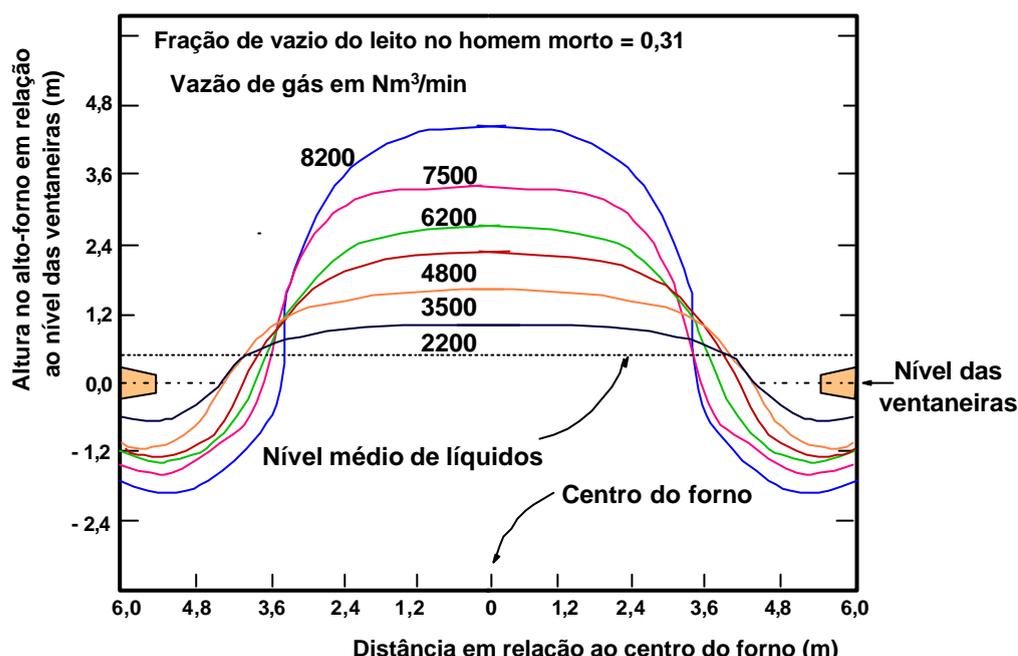


Figura 3.8 – Efeito da vazão de gás que sai da zona de combustão sobre os níveis de escória ao longo do raio do forno, segundo Hatano *et al.*, citado por Figueira *et al.*<sup>(5)</sup>.

Verifica-se que existe uma tendência da superfície da escória se aproximar de uma reta horizontal, à medida que se diminui a vazão de gás. Desse modo, quando a altura média dos líquidos é superior ao nível das ventaneiras, há uma vazão mínima de gás que se deve ter para evitar que a altura da escória junto à parede do forno aumente a ponto de atingir as ventaneiras, o que certamente causaria graves problemas<sup>(5,11,32)</sup>.

Por motivos já citados anteriormente, a altura da escória na região central do alto-forno é maior do que na periferia. Durante o vazamento, o nível da escória vai caindo, conservando ainda as maiores alturas na parte central do forno. Num dado instante, a superfície da escória junto à parede atinge o furo de corrida, observando-se, então, a saída de gases por este orifício. Nesse ponto, o vazamento é normalmente interrompido e, devido à diferença entre as alturas de escória no centro e na parede, uma certa fração

de escória fica retida no forno, (figura 3.9). A fração retida de escória caracteriza as condições de drenagem da escória no alto-forno<sup>(5)</sup>.

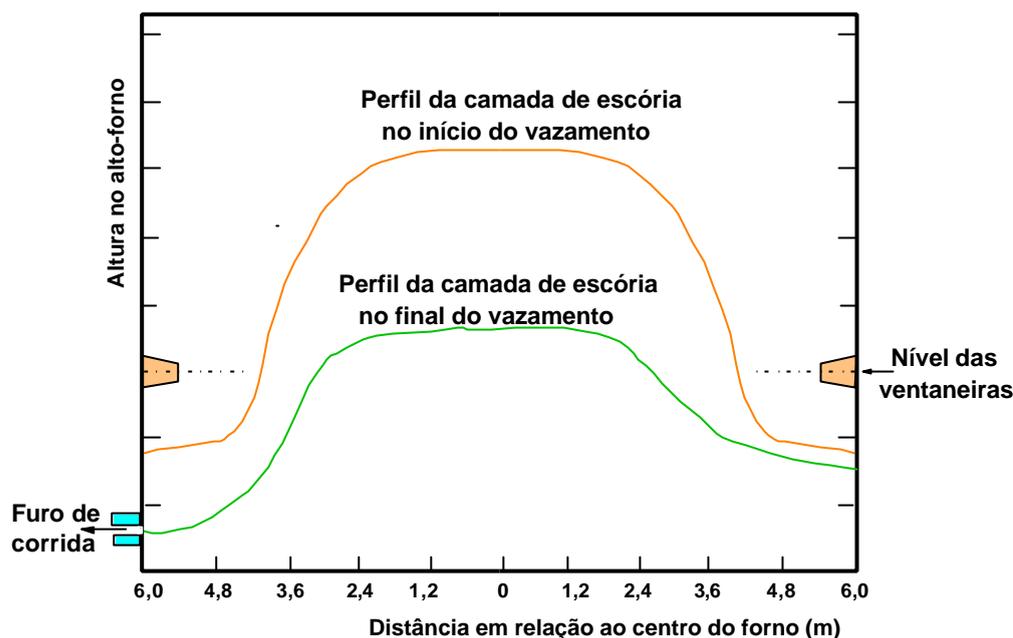


Figura 3.9 – Vista esquemática da drenagem da escória do cado de alto-forno<sup>(5)</sup>.

A fração de escória retida pode ser definida segundo a equação 3.8.

$$F = \frac{\text{volume de escória remanescente após o vazamento}}{\text{volume de escória antes do vazamento}} \quad (3.8)$$

Sendo F igual a fração de escória retida.

Segundo estudos desenvolvidos por Fukutake *et al.*<sup>(10)</sup>, a fração de escória retida é função do coeficiente de escoamento ( $C_E$ ), definido na equação 3.9.

$$C_E = 180 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{1}{y^2 d^2} \frac{m}{r} \frac{V_o}{g} \left( \frac{D}{h} \right)^2 \quad (3.9)$$

Em que,

- $C_E$  - coeficiente de escoamento (-);
- $d$  - diâmetro das partículas de combustível no cado (m);
- $D$  - diâmetro do cado (m);
- $g$  - aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );
- $h$  - altura de material líquido no cado (m);
- $V_o$  - velocidade da escória em relação à área do cado vazio (m/s);
- $\epsilon$  - fração de vazio do leito de combustível no cado (-);
- $\mu$  - viscosidade da escória (Poise);

$\rho$  - densidade da escória ( $\text{kg/m}^3$ );

$\psi$  - esfericidade das partículas de combustível no cadinho (-).

Esse fator tem relação direta com a fração de escória retida, (figura 3.10), sendo que os resultados obtidos cobrem uma faixa de propriedades listadas abaixo:

- ◆ viscosidade da escória: 4,9 cP a 99,6 cP;
- ◆ densidade da escória: 1,11  $\text{g/cm}^3$  a 1,22  $\text{g/cm}^3$ ;
- ◆ diâmetro de recipiente: 150 mm a 190 mm;
- ◆ diâmetro das partículas: 2,18 mm a 5,19 mm (distribuição uniforme, fração de vazios).

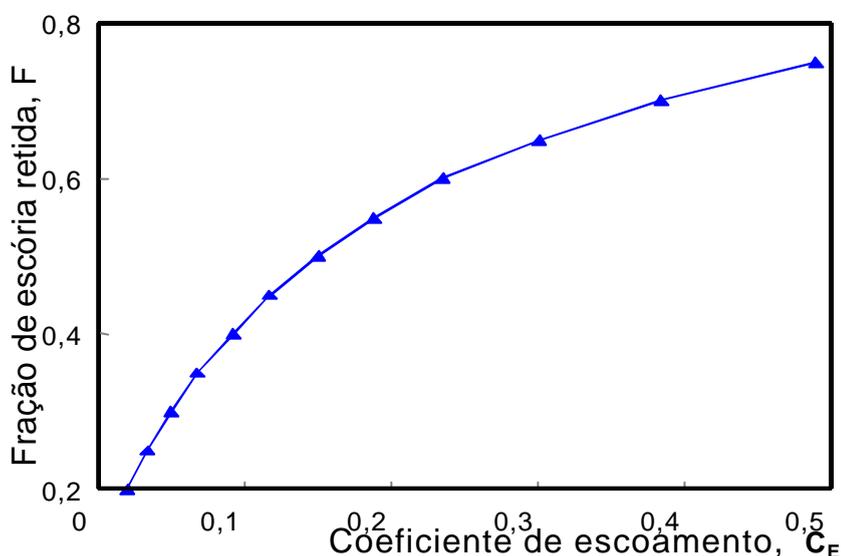


Figura 3.10 – Relação entre a fração de escória retida e o coeficiente de escoamento<sup>(5)</sup>.

Os parâmetros analisados acima são de difícil avaliação em um alto-forno, o que torna interessante relacionar a fração F ou a espessura da camada de escória retida com outras variáveis mais fáceis de serem determinadas. Com esse objetivo, Fukutake *et al.*<sup>(10)</sup> desenvolveram balanços de massa para a escória no cadinho e obtiveram, através de correlações matemáticas, expressões que permitem avaliar as espessuras médias da camada de escória no início e no final do vazamento. Os resultados obtidos são fornecidos abaixo:

- ◆ espessura média da camada de escória no início do vazamento [ $H_i$  (m)]:

$$H_i = 0,1959 \cdot (N_v D^2)^{-0,4757} \left( 1440 \frac{T_R}{M_D} - 1 \right)^{0,3834} (M_D)^{0,7378} (m)^{0,2598} \quad (3.10)$$

- ◆ espessura média da camada de escória no final do vazamento [ $H_f$  (m)]:

$$H_f = 0,0269 \cdot (N_v D^2)^{-0,1288} \left( 1440 \frac{T_R}{M_D} - 1 \right)^{0,2569} (M_D)^{0,5645} (\mathbf{m})^{0,4377} \quad (3.11)$$

Em que,

$N_v$  - número de vazamentos durante um dia (-);

$D$  - diâmetro do cadinho (m);

$T_R$  - taxa de retirada da escória durante o vazamento (t/min);

$M_D$  - massa de escória produzida durante um dia (t/d);

$\varepsilon$  - fração de vazio do leito de combustível no cadinho (-);

$\mu$  - viscosidade da escória (Poise).

O valor da taxa de retirada ( $T_R$  – t/min), da escória durante o vazamento pode ser calculado pela equação 3.12

$$T_R = \frac{M_D}{N_v T_v} \quad (3.12)$$

sendo que  $T_v$  é o tempo de duração do vazamento de escória (min/d).

O valor de  $T_R$  calculado pela relação acima representa um valor médio, pois a taxa de vazamento da escória varia durante o período de sua retirada.

Além dos fatores acima, a permeabilidade do combustível sólido no cadinho, que não aparece explicitamente nas relações de cálculo de  $H_i$  e  $H_f$ , também tem grande influência na remoção de escória, o que destaca a importância da resistência mecânica e da degradação do combustível ao longo do seu trajeto no alto-forno (Índice de tamboreamento – DI).

Dos parâmetros analisados acima, aqueles que variam em faixas mais amplas e que podem ser alterados mais facilmente pelo operador são os de maior importância no controle da drenagem do cadinho. São eles:

- ◆ taxa de retirada da escória e número de vazamentos;
- ◆ viscosidade da escória (estado térmico do forno).

Em experimento realizado por Chatterjee *et al.*<sup>(9)</sup> foi identificado que o aumento na viscosidade da escória causa aumento da convexidade na interface gás-escória, resultando em maior residual de escória dentro do alto-forno. Mantendo-se todos os

outros parâmetros constantes, e alterando a viscosidade de 0,41 poise para 0,83 poise o residual de escória aumentou de 0,53 para 0,83 a uma velocidade superficial constante igual a 0,6 cm/s. A drenagem do líquido é governada pelas forças viscosas e gravitacionais. Enquanto as primeiras tendem a segurar o líquido, as últimas, em função da densidade, lhe adicionam velocidade. Também foi mostrado que a taxa residual é função da quantidade inicial de escória dentro do cadinho. Quando o volume inicial de escória é maior, uma quantidade maior é retida no cadinho, no entanto, é possível retirar mais material reduzindo a taxa de esgotamento<sup>(9)</sup>. Finalmente, deve-se dizer que a fração de escória retida no alto-forno após o vazamento pode ser dada pela razão entre a altura final e inicial da escória no cadinho.

### 3.5.3 Escoamento do Gusa

Em relação a sua remoção do cadinho, o ferro-gusa apresenta um comportamento bastante diferente quando comparado ao da escória. Enquanto a fração de escória retida no alto-forno atinge valores em torno de 0,5 a 0,6, para o gusa, esses números são cerca de dez vezes menores. Isso decorre principalmente da menor viscosidade do gusa, quando comparada com a da escória. Entretanto, o estudo do escoamento do gusa é importante, pois este afeta a carga térmica e o desgaste nos refratários do cadinho<sup>(5,10,18,33-35)</sup>.

Existem dois diferentes padrões de escoamento do gusa no cadinho: um, no caso do homem morto estar flutuando, e outro, quando ele se encontra apoiado no refratário<sup>(5,24,36)</sup>. Esses padrões foram determinados empregando-se traçadores radioativos que possibilitassem medidas de tempo de residência do gusa, desde o instante em que ele está na interface da escória com o banho metálico até sua saída pelo furo de corrida. Para analisar os resultados, foram definidas as duas variáveis dadas nas equações 3.13 e 3.14.

$$t^* = \frac{t}{t_M} \quad (3.13)$$

$$S^* = \frac{S}{S_o} \quad (3.14)$$

Em que,

- $t$  - tempo de residência do gusa no cadinho (tempo gasto pelo gusa para ir da interface com a escória até o furo de corrida) (min);  
 $t_M$  - tempo médio de residência do gusa no cadinho (min);  
 $t^*$  - tempo de residência ponderado (-);  
 $S$  - área do cadinho coberta por um círculo cujo centro é o furo de corrida e o raio é a distância entre um ponto determinado e o furo de corrida ( $m^2$ );  
 $S^*$  - posição ponderada (-);  
 $S_0$  - área do cadinho ( $m^2$ ).

O tempo de residência médio do gusa no cadinho pode ser avaliado através da equação 3.15.

$$t_M = \frac{e l S_0 r_M}{T_{RM}} \quad (3.15)$$

Sendo,

- $l$  - espessura da camada de ferro-gusa no cadinho (m);  
 $t_M$  - tempo médio de residência do gusa no cadinho (min);  
 $T_{RM}$  - taxa de vazamento do gusa (t/min);  
 $\rho_M$  - densidade do ferro-gusa ( $t/m^3$ ).

A figura 3.11 mostra esquematicamente a definição de  $S^*$ .

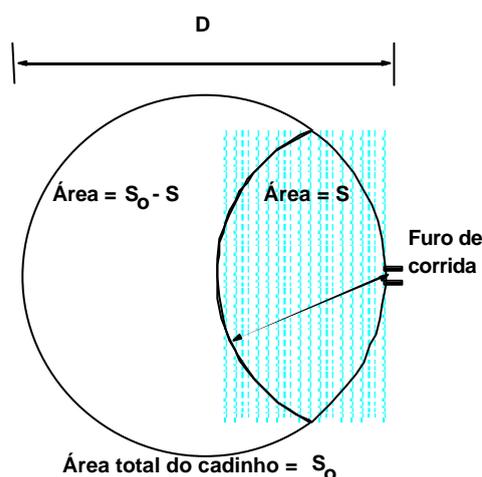
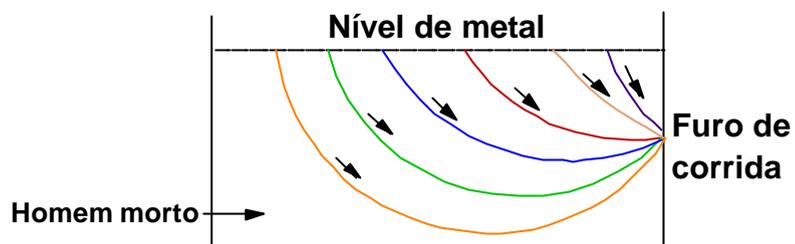


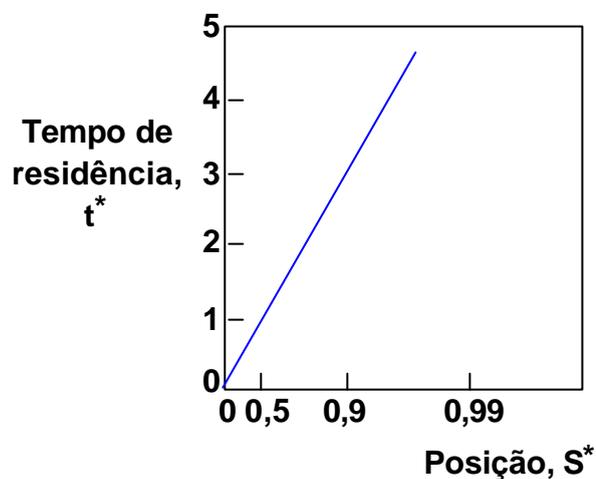
Figura 3.11 – Definição de  $S^*$  em termos das dimensões do cadinho<sup>(5)</sup>.

Foram feitas investigações do fluxo de metal no cadinho, durante a corrida, assumindo vazão constante, e o escoamento do gusa para o caso do homem morto apoiado no fundo do cadinho e do homem morto flutuando<sup>(10)</sup>.

As linhas representando a trajetória seguida pelo gusa, desde a interface com a escória até o furo de corrida, e a relação entre  $S^*$  e  $t^*$  são bem características para o caso do homem morto apoiado no fundo do cadinho, (figura 3.12)<sup>(5,10)</sup>.



**A- Linhas de fluxo do ferro gusa no vazamento**

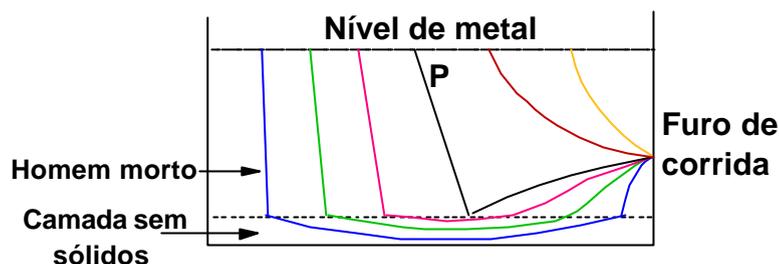


**B- Relacionamento entre  $t^*$  e  $S^*$**

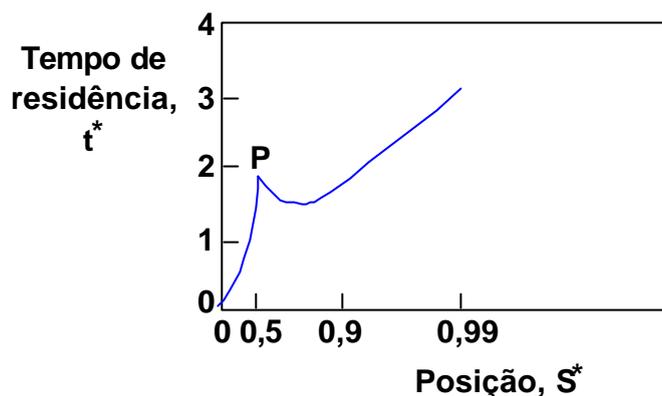
Figura 3.12 – Trajetórias do ferro-gusa e o relacionamento entre  $S^*$  e  $t^*$ , quando o homem morto está apoiado no fundo do cadinho, segundo Ohno *et al.*, citado por Figueira *et al.*<sup>(5)</sup>.

Similar ao caso anterior, também de forma bastante característica, estão as linhas representando a trajetória do gusa e a relação entre  $S^*$  e  $t^*$  na situação em que o homem morto está flutuando, (figura 3.13). Algumas das condições nas quais foram determinados esses perfis de fluxo são citadas abaixo<sup>(10)</sup>:

- ◆ diâmetro do cadinho: 11 m;
- ◆ produtividade: 400 t/h;
- ◆ viscosidade do gusa: 7,0 cP;
- ◆ nível de gusa: 3,0 m.



**A- Linhas de fluxo do ferro gusa no vazamento**



**B- Relacionamento entre  $t^*$  e  $S^*$**

Figura 3.13 – Trajetórias do ferro-gusa e o relacionamento entre  $S^*$  e  $t^*$ , quando o homem morto não está apoiado no fundo do cadinho, segundo Ohno *et al.*, citado por Figueira *et al.*<sup>(5)</sup>.

No gráfico da figura 3.13, pode-se identificar três regiões distintas:

- ✓ valores de  $S^*$  entre 0 e 0,5. Nesse trecho há um aumento do tempo de residência com a elevação em  $S^*$ , até se atingir um valor máximo. Esse valor corresponde ao ponto P visto na figura 3.13(b). Nota-se que, para este ponto, o fluxo de metal é todo feito dentro do homem morto, figura 3.13(a);
- ✓  $S^*$  entre 0,5 e 0,7. Nessa região ocorre uma diminuição do tempo de residência com o aumento de  $S^*$ . Observa-se que nesse trecho uma parcela do escoamento do gusa é através da camada sem sólidos no fundo do cadinho;
- ✓  $S^*$  maior que 0,7. Há um aumento no tempo de residência à medida que  $S^*$  cresce. Também nesse caso, uma parte do fluxo de gusa ocorre na região sem sólidos, no entanto o material está distante do furo de corrida.

Experimentos<sup>(37)</sup> utilizando sensores elétricos em um modelo físico visaram avaliar a influência da fração de vazios e da distância entre o fundo do cadinho e o início da coluna de coque na velocidade do líquido no cadinho. Eles mostraram que no caso do

cadinho estar completamente preenchido pelo coque, com fração de vazios uniforme, a velocidade central bem como a periférica era similar e aumentava com o aumento da fração de vazios e da taxa de vazamento. Entretanto, a magnitude da velocidade periférica foi relativamente maior que a central quando se analisou o homem morto flutuando. Segundo Elsaadawy *et al.*<sup>(27)</sup>, quando o homem morto está flutuando, existe uma região onde a resistência hidrodinâmica é muito menor do que dentro do leito de coque. Assim, o líquido prefere fluir primeiramente para a região livre de coque e posteriormente para o furo de gusa, até porque está sendo gasta menos energia que ir diretamente para o furo de gusa. Adicionado a isso, no modelo apresentado por Desai<sup>(37)</sup>, observou-se um aumento da velocidade na parede oposta ao furo de gusa com aumento da altura livre de coque, e diminuição da fração de metal que atravessa completamente o leito. No entanto, foi observado que aumento da fração de vazios na parte central do homem morto possibilitou um fluxo periférico menos pronunciado, isso para o caso de cadinho completamente preenchido pelo leito de coque. Portanto, além da influência do tamanho do coque e da fração de vazios do leito combustível, o fato do homem morto estar flutuando ou apoiado no fundo do cadinho, ou seja, a existência ou não de uma camada livre de sólidos, afeta profundamente a velocidade do metal no cadinho, e por conseqüência, o desgaste do refratário<sup>(13,21,22,30,37)</sup>.

Também no intuito de se avaliar a movimentação do líquido, em estudo de drenagem de material no cadinho de altos-fornos em operação, é vista na literatura a utilização de radiotraçadores, especialmente o cobalto. Normalmente o material é inserido pelo olhal da ventaneira, cerca de 20 a 25 min antes da abertura do furo de gusa. A lança que chega quase ao centro do cadinho, deposita o material no interior do forno, e, a partir daí, ocorre dissolução do cobalto no gusa. São realizadas as análises no laboratório, e é determinado o tempo gasto pelo gusa para se deslocar entre o local de colocação do cobalto até o furo de corrida<sup>(9)</sup>.

### 3.5.4 Modelos Matemáticos de Escoamento de Líquidos no Cadinho

Sabe-se que a modelagem matemática e computacional é uma ferramenta muito importante no setor siderúrgico, principalmente devido à elevada dificuldade e alto custo para a obtenção de informações diretamente em testes na planta industrial<sup>(38)</sup>. Considerando que o aumento da campanha do alto-forno exige estabilidade operacional e controle efetivo do desgaste refratário na parede do cadinho, fica claro a necessidade de um controle criterioso dessa região. Por sua vez, este controle requer conhecimentos do fluxo de líquidos e da transferência de energia no interior do reator. Isto para estimar a durabilidade refratária em regimes operacionais conhecidos e para propiciar o planejamento de novas estratégias de controle do desgaste. Além disso, no caso do cadinho de alto-forno, a complexidade dos fenômenos, combinada com as condições ambientais (elevada temperatura e agressividade química dos líquidos), tornam extremamente difícil a obtenção de medidas confiáveis do processo<sup>(1)</sup>. Avaliações do cadinho levam em consideração transferência de energia, convecção natural, fluxo em leito poroso e extenso range de geometria e de velocidades<sup>(38)</sup>. Assim sendo, diferentes e complementares estudos e experimentos vêm sendo desenvolvidos, principalmente trabalhos de modelagem matemática, em busca de possibilitar contínuos aprendizados em fluxos de líquidos e gases e sua relação com a permeabilidade no cadinho bem como sua relação com todos os fenômenos internos do alto-forno<sup>(39,40)</sup>. Portanto, uma maneira de monitorar as informações internas do reator é por meio de modelos matemáticos, os quais consideram mudanças dinâmicas no cadinho<sup>(16)</sup>. Diversos modelos matemáticos vêm sendo desenvolvidos e reportados na literatura. Em sua grande maioria, são baseados no método de diferenças finitas, e simulados para fluidos no interior do cadinho do alto-forno<sup>(17)</sup>. No entanto, ainda é desejável o aprimoramento de um modelo próprio, afim de adequá-lo às práticas operacionais e aos equipamentos da empresa.

É consenso por partes dos especialistas<sup>(17)</sup> a necessidade de estabilidade na operação do alto-forno e boas condições do cadinho para que se tenha um controle preciso da drenagem de material, e, conseqüentemente, se tenha redução de energia na produção de gusa. Entretanto, os efeitos das variáveis nas condições internas do forno, bem como os fatores que influenciam na drenagem do cadinho não são bem examinadas.

Trabalhos realizados<sup>(41)</sup>, com abordagem voltada para o prolongamento da campanha do alto-forno, indicam que a durabilidade da parede refratária do cadinho é fortemente relacionada ao fluxo de líquidos. Estudos experimentais e numéricos foram desenvolvidos buscando avaliar o efeito da camada de coque e a movimentação do fluido no cadinho. Por meio deles, baseado nas condições operacionais consideradas, a velocidade do líquido e a distribuição de temperatura foram calculadas para estimar o efeito da forma do homem morto na parede refratária e na drenagem do gusa<sup>(26)</sup>.

Alguns estudos<sup>(22,26,37)</sup> indicaram que ocorre notável recirculação do fluido, induzida pela convecção natural, e que a velocidade do gusa aumenta no fundo do cadinho quando o homem morto está flutuando, afetando a dissolução de carbono do refratário no metal. Inclusive, foi determinado que as forças de empuxo levam a uma recirculação do fluido, principalmente quando o homem morto está flutuando. No entanto, outros modelos consideram nítida a alteração da velocidade próxima à parede refratária, mas assumem que a convecção natural é negligenciável.

Nishioka *et al.*<sup>(42,43)</sup> desenvolveram um modelo, baseado no método de diferenças finitas, para simular o fluxo de gusa e escória no cadinho. Seus resultados indicaram que o comportamento da drenagem e do volume residual de gusa e escória são afetados pelas condições do cadinho. As condições na região periférica no nível do furo de gusa determinam o volume residual de escória. Segundo eles, a fração de vazios tem mais efeito na interface gás-escória. Enquanto a distribuição do diâmetro de coque assim como a uniformidade do leito, o espaço livre de coque e a zona impermeável abaixo do furo de gusa têm pequeno efeito na drenagem total, as condições do furo de gusa dominam a drenagem quando se assume constante as demais variáveis do alto-forno. Uma alternativa para se reduzir o volume de escória residual seria o controle da variação do diâmetro do furo de gusa. Curiosamente, os autores afirmaram também que o aumento no diâmetro de coque, apesar de diminuir o volume residual de gusa dentro do cadinho, causa aumento no volume residual de escória.

Ainda sob o aspecto do controle do furo de gusa, Nouchi *et al.*<sup>(30,44)</sup> mostraram a importância do equilíbrio do tempo de corrida, uma vez que a corrida muito longa provoca acúmulo de escória. No entanto, corridas muito curtas não possibilitam a chegada da escória ao furo de gusa. Por outro lado, afirmaram que a quantidade de

escória residual aumenta proporcionalmente ao quadrado da produção. O efeito da permeabilidade no cadinho é maior que o da viscosidade da escória. Ou seja, a qualidade do coque é mais importante que a qualidade e basicidade do síter para reduzir o volume de escória no cadinho, principalmente para alta produção.

Em termos gerais, corridas longas significam alto nível de escória. Em condições similares de corrida, diâmetro maior de furo de gusa (FG) e alta resistência da massa de taponamento reduzem o nível de escória, porque o nível máximo de escória diminui proporcionalmente ao quadrado da velocidade inicial de drenagem. Além disso, boa qualidade da massa de taponamento é necessária para manter a duração de corrida adequada à operação em condição de elevada produtividade.

### **Formulação Matemática**

As formulações matemáticas de fluxo de líquidos no cadinho são baseadas, fundamentalmente, no balanço de massa e de força, na equação de Navier-Stokes e, em equações que representem a resistência interna do reator à passagem do material líquido (normalmente equação de Ergun ou de Carman).

Na maioria das vezes, o cálculo é feito assumindo as seguintes condições<sup>(41)</sup>: i) o líquido é uniformemente gotejado ao cadinho; ii) o nível de gusa é constante e tido como horizontal; iii) a inexistência de escória; iv) a metade do cadinho é escolhida como região de domínio; v) a camada de coque é tratada como leito poroso; e vi) a resistência viscosa e de inércia é aplicada na equação de momento.

A taxa de produção de gusa e escória pode ser estimada por meio da análise do gás de topo e dos parâmetros de sopro, considerando a composição da carga, assumindo condições quase estacionárias<sup>(16)</sup>.

Equações de balanço de massa de gusa e escória são aplicadas para estimar o volume instantâneo do líquido no cadinho e transformá-lo em nível de líquido baseado na geometria interna e nas propriedades do homem morto conhecidas. A relação entre volume de líquidos e nível vertical depende fortemente do estado de flutuação do homem morto. Em alguns casos, o fluxo de gusa é calculado baseando-se em medidas de líquidos no torpedo, enquanto que o fluxo de escória é calculado pela mudança no sinal de pressão no sistema de granulação<sup>(1)</sup>.

Não existe medida de nível da escória, mas essa variável deve também ser controlada para se evitar o acúmulo de escória. Além disso, a escória é assumida a um determinado nível, superior a zero, no final de cada corrida, com algumas variações que permitam o cálculo do nível final. Na grande maioria das vezes, a formulação é, acima de tudo, diretamente aplicada considerando o homem morto assentado no fundo do cadinho e a fração de vazios conhecida. Contudo, em alguns casos, ele flutua, e normalmente são consideradas algumas simplificações:

- ◆ o homem morto está assentado ou flutua durante toda a corrida;
- ◆ a força de empuxo da fase escória é constante, apesar da sua espessura variar, (a baixa densidade da escória pode justificar parcialmente essa consideração);
- ◆ o peso da carga é constante.

Serão citadas aqui considerações de alguns modelos da literatura que nortearam o desenvolvimento do modelo adaptado neste trabalho.

O modelo de simulação do nível de líquidos no cadinho, desenvolvido por Brännbacka *et al.*<sup>(16)</sup>, não se preocupou com a forma de escoamento no interior. Foi considerada a fração livre no homem morto como constante, e a mudança de volume da fração livre de coque na região abaixo do homem morto foi considerado o fator mais decisivo da relação entre volume de líquidos e seu nível.

Para validação do modelo desenvolvido<sup>(16)</sup>, o cálculo foi comparado ao sinal medido na própria operação do alto-forno, e apresentou um excelente resultado. O nível de líquidos pode ser estimado por medidas de pressões, mas esta técnica é apropriada para períodos breves de medição, e não para uso da rotina *on-line* durante toda campanha do alto-forno<sup>(45)</sup>. O cálculo do nível de gusa é uma estimativa do real nível no cadinho, mas a magnitude da variação depende fortemente da fração de vazios do homem morto e de seu procedimento de flutuação. Por outro lado, o cálculo do nível de escória monitora a tendência, apesar de não refletir o valor real.

Para exemplificar a utilização do modelo, pode-se acompanhar o nível do líquido por um determinado período e a temperatura da corrida, (figura 3.14). Nessa figura, pode se destacar a importância da confiabilidade do modelo pelo comportamento da quarta corrida, que se apresentou muito problemática. Quando o furo de corrida foi aberto o fluxo de gusa não foi suficiente para exceder a produção, subindo o nível do líquido no

cadinho. O furo foi temporariamente fechado e reaberto com um diâmetro maior, resultando numa boa drenagem. Uma implicação dessas mudanças ocorridas no cadinho foi a queda de temperatura, ou seja, resfriamento do cadinho. O interessante de se observar é que o modelo identificou uma elevação no nível de escória, enquanto que o sinal medido mostrou uma pequena flutuação no nível de líquidos.

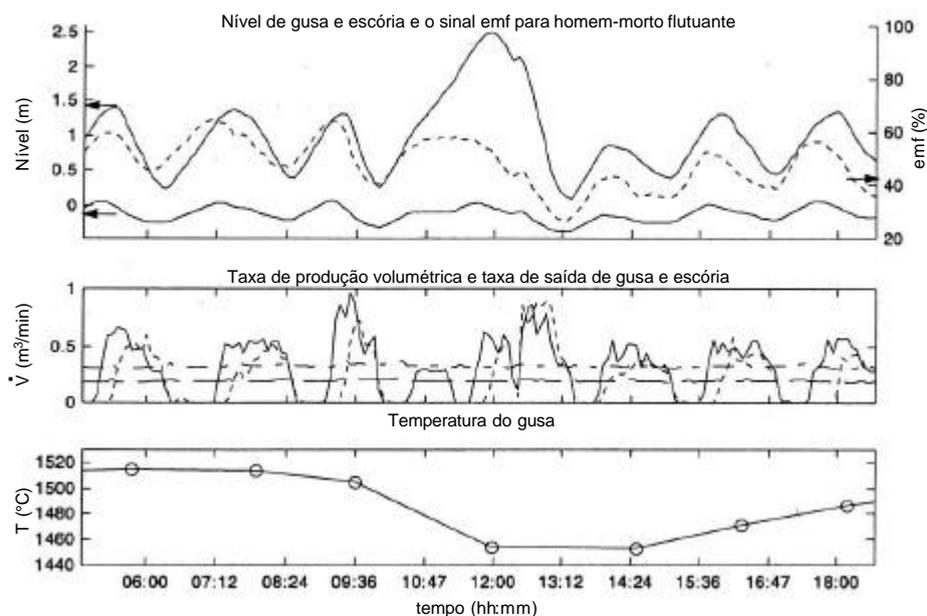


Figura 3.14 – Painel superior: simulação do nível de gusa e escória para homem morto flutuando (linhas contínuas), e o sinal medido (linha tracejada). Painel central: vazão de gusa (linha contínua) e escória (linha tracejada), bem como taxa de produção das duas fases (linha tracejada praticamente horizontal). Painel inferior: temperatura do metal líquido para as sete corridas<sup>(1)</sup>.

Já em estudo realizado por Nishioka *et al.*<sup>(17)</sup>, foi considerada a variação da velocidade e sua influência no perfil de escoamento do fluido.

Para distinção das interfaces (gás-escória e escória-gusa) foi aplicado o método VOF (*Volume of Fluid Method*), geralmente usado em fronteiras livres em malhas tridimensionais.

Sob o ponto de vista de avaliação dos fatores que influenciam na erosão do cadinho, Takatani *et al.*<sup>(23)</sup> desenvolveram um modelo baseado no fluxo de líquidos em seu interior, (figura 3.15). Nesse sistema, balanços de força e de momento são requeridos para o gusa, e balanços de energia para gusa e refratários.

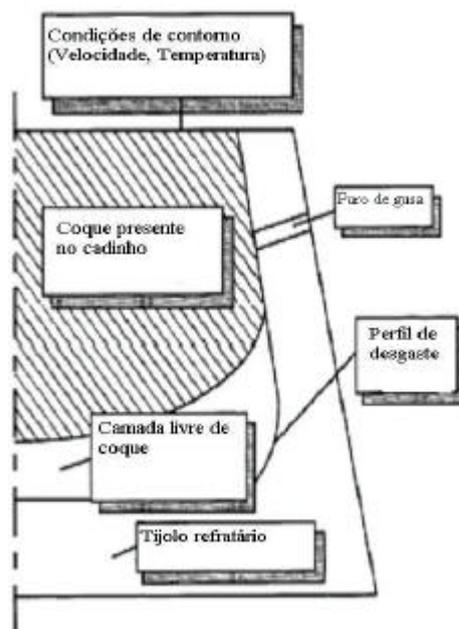


Figura 3.15 – Sistema assumido para modelagem<sup>(23)</sup>.

As equações de Navier-Stokes (equações 3.16 a 3.18) governam o processo. A velocidade é representada por  $U$ , e  $F_R$  representa a resistência ao fluxo, obtida pela equação 3.19, de Ergun<sup>(23)</sup>.

Equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial(\epsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon\rho U) = 0 \quad (3.16)$$

Equação de conservação de quantidade de movimento:

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho(U \cdot \nabla)U = -\nabla p - \mu \nabla^2 U + F_R \quad (3.17)$$

em que,

$\rho \frac{\partial U}{\partial t}$  é o termo de acumulação;  $\rho(U \cdot \nabla)U$  é o termo de convecção, e  $\mu \nabla^2 U$  é o termo de difusão.

Equação de conservação de energia:

$$\rho \frac{\partial(C_p T)}{\partial t} + \rho(U \cdot \nabla)C_p T = \nabla(k \nabla T) \quad (3.18)$$

Equação de Ergun:

$$F_R = \left\{ 150 \left[ \frac{1-e}{ed} \right]^2 m + 1,75 \left[ \frac{1-e}{ed} \right] r |U| \right\} U \quad (3.19)$$

Em que,

- $F_R$  - resistência ao fluxo (-);
- $d_p$  - diâmetro das partículas de coque no cadinho (mm);
- $U$  - velocidade do fluido (m/s);
- $\epsilon$  - fração de vazios do leito (-);
- $\mu$  - viscosidade da escória (Poise);
- $\rho$  - densidade da escória ( $\text{kg/m}^3$ );
- $\psi$  - esfericidade das partículas de combustível no cadinho (-).

As principais condições de contorno adotadas foram<sup>(23)</sup>: a temperatura e o fluxo de metal são conhecidos no limite superior do cadinho; e a região superior é considerada como adiabática; a vazão de gusa é conhecida; o fluxo térmico no fundo e na parede são conhecidos; a posição do homem morto estimada a partir da análise de força no interior do forno.

Dentre os fatores avaliados na modelagem, podem-se citar a distribuição do perfil de gotejamento do metal, a produção de gusa, o assentamento do homem morto no cadinho, a condutividade térmica do tijolo refratário, e a resistência interna (camada de coque) ao fluxo.

Um outro modelo que merece destaque foi desenvolvido por Chew *et al.*<sup>(19)</sup>. Ele busca descrever o fluxo de líquido no cadinho, avaliando a influência da zona interna do reator no seu perfil de escoamento. Cálculos foram feitos considerando o cadinho como um cilindro que apresenta permeabilidade diferente ao longo do raio, além de outras considerações.

A zona de fluxo do líquido foi caracterizada por: i) fração de vazios,  $\epsilon$ ; ii) os raios  $R$  do cadinho e  $r$  correspondente ao raio da zona impermeável; iii) homogeneidade da alimentação de líquidos; iv) altura dos líquidos,  $h$ .

O modelo numérico, considerando a heterogeneidade no cadinho, foi desenvolvido para fluxo laminar porque, exceto próximo ao furo de gusa,  $Re$  é igual a 0,76.

Para calcular a fração de vazios, foram levados em consideração os espaços ocupados pela escória, os quais variaram no cálculo de 0,4 a 0,6 para zona permeável anelar, e 0,1 a 0,3 para a zona central impermeável.

Primeiramente foi verificado que os cálculos para o caso de cadinho homogêneo apresentaram boa concordância com as leis observadas no modelo físico. Então foram feitos os cálculos para um modelo heterogêneo do cadinho, o que resultou num grande aumento da velocidade dos líquidos próximo à parede e na área periférica quando o tamanho da zona impermeável aumentou de 20% para 50% em volume do cadinho.

Também foi possível observar que com maior zona central impermeável, a quantidade de líquido que flui nos limites, os quais correspondem à fronteira do homem morto, se torna muito importante. Isso poderia levar a maior retenção de material na zona periférica com aumento do tamanho da zona impermeável central. Esses resultados estão de acordo com os medidos pelos traçadores radioativos.

Segundo Chew<sup>(19)</sup>, as propriedades físicas do líquido e a vazão do gás e do líquido são afetadas pela sua distribuição radial através da camada de coque, sendo esta influenciada pelo arraste e pela quantidade do gás na zona coesiva. Esta última é controlada pela distribuição radial de minério/coque. A estrutura da zona coesiva, identificada pela dissecação realizada pelos japoneses, consiste de partículas sobrepostas de minérios em fase de amolecimento e fusão separadas por camadas de coque. A divergência no fluxo de gás através das camadas de coque provoca aumento na retenção de líquidos, gerando um perfil característico ao longo da zona coesiva.

Também baseado nas equações de conservação, Huang *et al.*<sup>(46)</sup> desenvolveram um modelo matemático que permite avaliar a influência da estrutura do homem morto, localização, forma, tamanho e sua permeabilidade no fluxo de líquidos e de temperatura. Além disso, avaliou o impacto do tamanho do “cogumelo” de proteção, normalmente existente abaixo do furo de gusa. Em seu estudo, o cadinho foi dividido em três zonas: zona morta; zona de coque e zona livre (figura 3.16). O homem morto inclui a zona morta e a de coque, sendo que, enquanto o seu centro foi considerado impermeável ao líquido, a região chamada de zona livre é altamente permeável ao fluxo. A forma do homem morto e sua posição no cadinho (assentado ou flutuando) foi baseada em observações industriais.

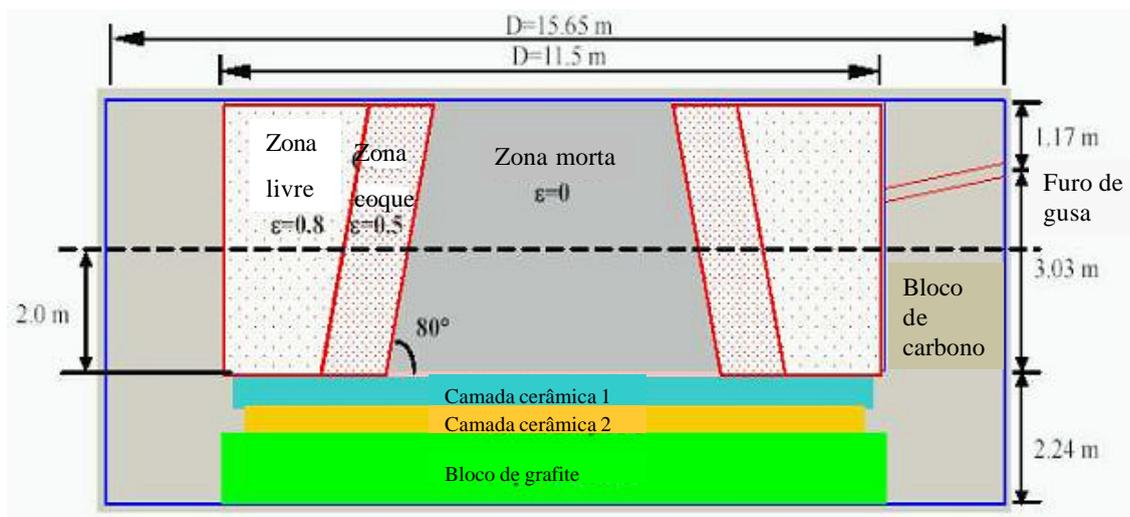


Figura 3.16 – Cadinho de alto-forno<sup>(46)</sup>.

### Propriedades dos Materiais

Para consistência e representatividade do modelo são necessárias, além de medidas confiáveis das variáveis de entrada, propriedades bastante próximas das reais de processo. Neste tópico, serão listadas as principais propriedades que influenciam na movimentação dos líquidos no interior do cadinho. Serão apresentados os valores utilizados em modelos da literatura. Em alguns casos, determinados experimentalmente; em outros, apenas relações empíricas.

Sabe-se que uma das características chave para boas condições de operação do forno é a qualidade da escória, especialmente no que diz respeito a permeabilidade do gás na zona coesiva e a fluidez do líquido, além da preservação térmica na parte baixa do alto-forno<sup>(47)</sup>. Viscosidade, densidade, tensão superficial, molhabilidade do coque e condutividade térmica das escórias são medidas para investigar as suas propriedades físicas durante a corrida. Inaba *et al.*<sup>(47)</sup>, sintetizaram escórias, visando avaliar suas propriedades físicas.

A viscosidade aumenta consideravelmente com o abaixamento da temperatura em processos convencionais, o que pode causar dificuldades na operação. É usual um acompanhamento da evolução da viscosidade de escórias usando modelos teóricos<sup>(32)</sup>. Baseado no estudo de Husslage *et al.*<sup>(48)</sup>, as características da escória e do gusa são mostradas respectivamente nas tabelas III.1 e III.2.

Tabela III.1 – Características da escória<sup>(48)</sup>.

Escória	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fusão (°C)	Temp. (°C)	r <sub>1</sub> (kg.m <sup>-3</sup> )	η <sub>l</sub> (Poise x 10 <sup>-1</sup> )	S <sub>1</sub> (N.m <sup>-1</sup> x 10 <sup>-3</sup> )
A	5	35	10	50	≈1320	1400	2,6	12,7	≈460 <sup>**</sup>
						1500	2,6	6,0	≈460 <sup>**</sup>
						1600	2,6 <sup>*</sup>	4,5	≈417 <sup>*</sup>
B	10	38	12	40	≈1375	1400	2,6	8,2	≈477 <sup>**</sup>
						1500	2,6	4,2	≈466 <sup>**</sup>
						1600	2,6 <sup>*</sup>	3,0	≈453 <sup>*</sup>

\* Estrapolado do *slag* atlas.\*\* Interpolado do *slag* atlas.Tabela III.2 – Características do ferro-gusa<sup>(48)</sup>.

Ferro-gusa	S (%)	C (%)	Al (%)	Mn (%)	Fusão (°C)	S <sub>1</sub> (N.m <sup>-1</sup> x 10 <sup>-3</sup> )
Baixo S	0,029	3,4 ~ 3,7	0,310	0,162	≈1250 ~ 1200	≈0,73
Alto S	0,41	3,8	0,240	0,155	≈1200	≈1,6

Experimentos<sup>(48)</sup> revelaram que as escórias não fluem em camadas de coque com partículas inferiores a 10 mm, enquanto que amostras de ferro-gusa escoaram através do leito de coque com partículas entre 3,14 mm a 4,0 mm. Contudo, o gusa não flui através de coque com tamanhos entre 2,8 mm e 4,0 mm quando o fluxo contracorrente dos gases chegam a 5,0 Nl/min a 1500°C. Isso implica num bloqueio do fluxo, quando quase não existem vazios.

Segundo Husslage *et al.*<sup>(48)</sup> as escórias A e B, com composições diferentes, apresentam comportamentos distintos de escoamento. Isso, possivelmente, ocorre porque o SiO<sub>2</sub> é reduzido pelo coque. Então, enquanto uma forma um filme na superfície do coque, a outra flui mais por entre os vazios deixados pelas partículas. Ambos, gusa e escória, fluem intermitentemente através do leito e em caminho distinto, o qual é aleatoriamente distribuído. Esses caminhos tendem a se alargar quando a resistência aumenta em direção ao fluxo, isto é, depende do tamanho das partículas (distribuição) e vazão de gás. Dessa maneira, apenas parte do volume dos poros disponíveis é utilizada. O gusa pode fluir através de vazios menores entre as partículas de coque quando comparado à escória. Apesar dessa informação, não existe uma equação matemática que relacione essas variáveis ao escoamento. Portanto, na modelagem matemática do fluxo de

líquidos é extremamente complicado considerar essa variação.

Assim, o estudo realizado por Nishioka *et al.*<sup>(17)</sup>, dentre outros, considera o gotejamento de gusa e escória uniforme, e a fração de vazios em torno de 0,3. As condições computacionais consideradas são listadas na tabela III.3.

Tabela III.3 – Condições computacionais<sup>(17)</sup>.

Malha	15(r)x19(z)x16(θ)
Viscosidade da escória (Pa.s)	0,27; 0,54; 1,08
Viscosidade do gusa (Pa.s)	0,0067
Altura inicial (m)	Escória: 3,6; Gusa: 2,6
Taxa de drenagem (m/s)	Evolui com o modelo
Diâmetro de coque (10 <sup>-3</sup> m)	15; 20; 25; 30; 40

As propriedades usadas por Lee *et al.*<sup>(41)</sup> para estudar o efeito do estado do homem morto no fluxo de líquidos no cadinho são listadas na tabela III.4.

Enquanto que Chew *et al.*<sup>(19)</sup> usaram as propriedades mostradas na tabela III.5 para avaliar a influência da permeabilidade da zona baixa do alto-forno na distribuição do fluxo de líquidos.

Tabela III.4 – Propriedades da camada de coque utilizadas na análise numérica<sup>(41)</sup>.

Espécie	Propriedades	Valores
Gusa	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	6600
	Viscosidade (Pa.s)	0,0066
	Temperatura (°C)	1550
	Condutividade térmica (W/m.°C)	16,5
	Produção (t/d)	9500
Camada de coque	Diâmetro da partícula (m)	0,03
	Fração de vazios (-)	0,5

Tabela III.5 – Propriedades físicas dos líquidos no alto-forno<sup>(19)</sup>.

Líquido	Densidade r (kg.m <sup>-3</sup> )	Viscosidade m (Pa.s)
Gusa	6600	0,005
Escória	2600	0,3

Ainda no estudo de Chew *et al.*<sup>(19)</sup>, o tamanho do coque e a fração de vazios foram fixados, respectivamente, em 35 mm e 0,4 na zona baixa do forno. Através do modelo é possível observar a descida do coque até o homem morto, enquanto que o minério desaparece na zona coesiva. O vetor velocidade do gás rapidamente se distribui após sair da região do *raceway*. O fluxo de gases ascendentes segue o perfil do forno, exceto

na zona coesiva onde camadas de amolecimento e fusão redistribuem o gás. A presença de líquidos na zona baixa do forno diminui os poros para passagem do gás, aumentando o gradiente de pressão quando comparado à cuba. Geralmente o metal líquido gerado na zona coesiva não é notadamente afetado pelo arraste do gás, exceto nas vizinhanças do *raceway*. O estreitamento do perfil do forno da rampa ao cadinho causam forte movimento do gusa próximo à parede. E o fluxo na direção radial é também intenso, refletindo na distribuição de minério/coque. Fluxos similares são observados para escória conquanto que o efeito de arraste do gás é mais significativo, com mínima passagem de líquido pela região do *raceway*. Esses resultados devem ser considerados no contexto de simulações de natureza bidimensionais, onde o líquido é incapaz de fluir pelo *raceway*, isto é na região de fluxo de gás.

Segundo os autores<sup>(19)</sup>, utilizando o modelo desenvolvido, foi possível estimar as áreas efetivas de interação gás-líquido e sólido-líquido. Foi constatado que essas interações para o gusa são significativamente menor que para escória, nas condições simuladas. Para ambos os líquidos, a magnitude da interação gás-líquido foi maior que a sólido-líquido o que se deve ao não-molhamento do sólido e às condições dinâmicas do fluxo. A avaliação dessas informações é extremamente importante quando se deseja modelar a transferência de massa no processo como dissolução de carbono e absorção de silício, que dependem da área de contato.

### **Características da Região Inferior do Alto-Forno**

Para melhor formulação do modelo matemático, aliado ao conhecimento das propriedades dos materiais no interior do cadinho, é necessário um conhecimento aprofundado das características da região inferior do alto-forno. Para tanto, uma série de modelos vêm sendo desenvolvidos abordando a movimentação do coque e o quão ela é influenciada pelo carvão pulverizado, assim como as diferentes características do homem morto ao longo do raio do forno.

Sabe-se que o coque permanece no cadinho por um longo tempo de residência. Portanto, má qualidade do coque torna difícil a drenagem do gusa uma vez que diminui a fração de vazios no interior do reator. Além disso, pode provocar descida irregular da carga<sup>(28)</sup>.

É importante registrar que, cada parada não programada do alto-forno causa uma queda

do material dentro do cadinho, mudando drasticamente o comportamento do coque, bem como os mecanismos das reações cinéticas e o balanço de energia térmica, obviamente com efeito na deterioração do cadinho<sup>(28)</sup>.

Vale destacar também que, com o aumento da taxa de injeção de carvão pulverizado, as condições na região do homem morto vêm exigindo uma maior atenção devido aos grandes efeitos na distribuição de gás e líquidos na parte baixa do forno. A permeabilidade dessa região depende da estrutura das camadas de coque que inclui, não somente diâmetro da partícula, fator de forma, arranjo das partículas e vazios, mas também a deposição de partículas finas e resistência dos líquidos. Para controlar e otimizar a permeabilidade da região do homem morto, é necessário se entender o processo de acumulação desses materiais. A acumulação inclui deposição, remoção, consumo e transporte<sup>(20,21)</sup>.

Serão descritas, a seguir, as considerações de alguns dos modelos sobre comportamento do coque, com suas respectivas avaliações.

Nogami *et al.*<sup>(20,21)</sup> observaram que o empacotamento de coque na região do cadinho varia com o aumento do nível de líquidos devido ao peso da carga. A forma de estimar esse balanço de força no interior do cadinho é baseada na resistência da carga e no seu peso. Isso mostra que é formado um espaço livre de coque em grande parte dos fornos atuais sendo que, em alguns casos, esse vazio existe apenas numa parte periférica.

Utilizando modelo a frio do alto-forno, Nogami *et al.*<sup>(20,21)</sup> mostraram que o fluxo global de partículas do centro e da superfície do homem morto ao *raceway* é induzido pelo movimento de subida e descida da camada de coque no cadinho. Isso leva a crer que esse fenômeno é um dos mecanismos de renovação do coque, e essa ação é considerada uma regra de grande importância na definição do consumo e acumulação de finos de combustível influenciando na fluidez dos líquidos.

A taxa de renovação do homem morto, entretanto, é discutida meramente baseando-se na taxa de descarga de partículas da zona do *raceway* e da taxa de geração de espaços vazios.

O movimento de subida e descida do homem morto é induzido pelo balanço de forças associadas, gravidade, empuxo e arraste das partículas pelo gás, e é considerado que o movimento serrilhado horizontalmente das partículas seja gerado pela distribuição do

balanço de forças e pelo consumo das partículas no *raceway*.

Em estudo realizado por Nishioka *et al.*<sup>(19)</sup> é possível avaliar o efeito do diâmetro das partículas do leito de coque na espessura da camada de gusa e escória retida no cadinho. Observou-se que com o aumento do diâmetro, a espessura da camada de escória retida no cadinho diminui, enquanto que a de gusa aumenta. Isso pode ser explicado pelo fato de o maior diâmetro do coque possibilitar melhor escoamento da escória. Conforme se observa na figura 3.17, o aumento da espessura de gusa é relativamente baixo, o que leva a crer que se obterá maior drenagem do cadinho como um todo. Por outro lado, um menor diâmetro de coque causa diminuição na permeabilidade do leito, levando a uma redução da pressão de sopro e, por conseqüência, da pressão no furo de gusa. Como resultado, ocorre diminuição na taxa de drenagem e aumento no tempo de corrida, (figura 3.17).

O efeito da viscosidade da escória na variação do volume é relativamente pequena quando comparada ao efeito do diâmetro do coque, (figura 3.18).

A espessura média de gusa e escória também depende do diâmetro de coque da região periférica, especialmente próximo ao furo de gusa. Ou seja, para melhor drenagem de escória, é importante um diâmetro grande de coque, (figura 3.19).

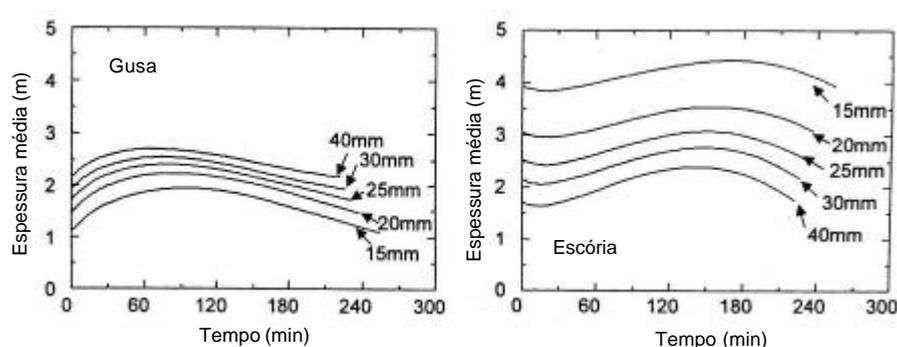


Figura 3.17 – Efeito do diâmetro as partículas de coque na espessura média do gusa e da escória<sup>(17)</sup>.

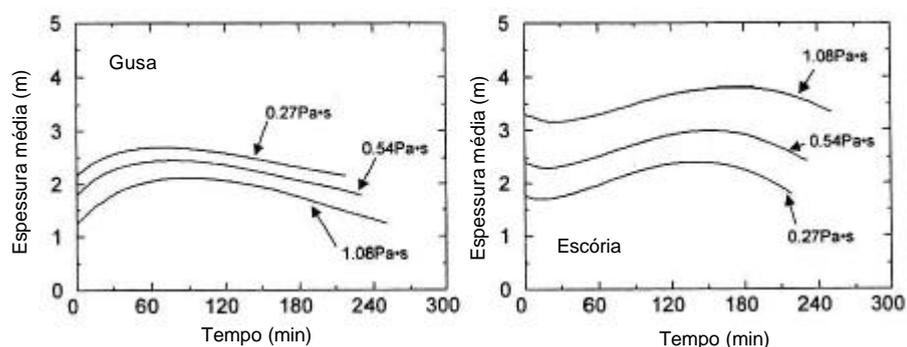


Figura 3.18 – Efeito da viscosidade da escória na taxa de drenagem de gusa e escória<sup>(17)</sup>.

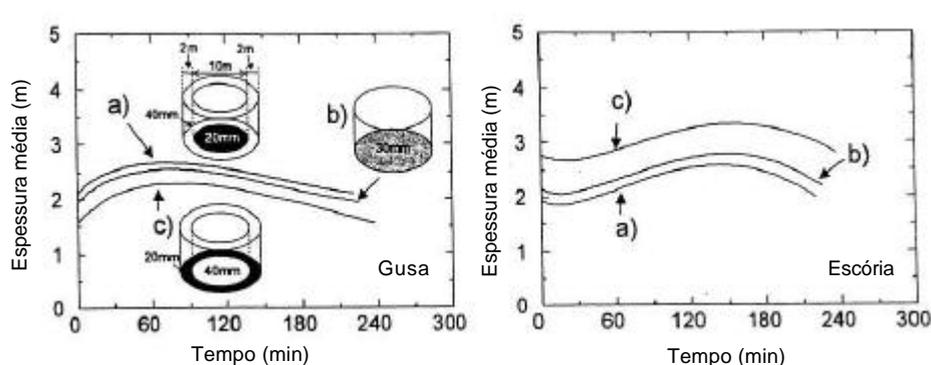


Figura 3.19 – Espessura média de gusa e escória para diferentes configurações do leito.  
 a) Zona de elevada permeabilidade periférica; b) Permeabilidade uniforme; c) Zona de baixa permeabilidade periférica<sup>(17)</sup>.

O estudo mostrou que o diâmetro de coque na região periférica do cadinho determina o volume de escória durante a corrida<sup>(17)</sup>.

Husslage *et al.*<sup>(48)</sup> desenvolveram um trabalho sobre fluxo de escória e gusa, a 1400°C e 1600°C, através da camada de coque, com o objetivo de investigar fenômenos básicos de procedimento de descida dos líquidos na zona de gotejamento. Nesse trabalho, as partículas de coque variaram de 15 mm a 50 mm. O transporte de massa foi considerado uma função do fluxo de gás. Os modelos foram construídos baseados em análises adimensionais, sendo que a distância inter-partículas de coque é de crucial importância. Além disso, a tensão superficial e o ângulo de contato influenciam fortemente no fluxo do líquido.

As análises experimentais<sup>(48)</sup> mostraram que, especialmente o espaço livre de coque é um importante fator na determinação do fluxo de líquidos. A velocidade do líquido no espaço livre de coque é muito maior que dentro do homem morto, e a diferença de

velocidade diminui com o aumento da espessura da camada livre. Sabendo-se que o espaço livre é uma regra chave na determinação da distribuição do fluxo de líquidos, se torna necessário predizer sua forma criada nos atuais altos-fornos.

Foi estimado por cálculos que o fluxo de líquido<sup>(41)</sup> tende a ser circunferencial no caso de espaço livre anelar, enquanto que a velocidade aumenta em toda base do cadinho com a existência de espaço livre de coque horizontal. No caso do leito de coque ocupar todo o cadinho, elevada velocidade se concentra na região próxima ao furo de gusa, enquanto que no caso de espaço livre anelar, a velocidade elevada se concentra na área periférica. No caso de espaço livre horizontal, a velocidade próxima ao centro, no fundo do cadinho, é maior. Contudo, é relativamente menor próximo à parede. Foi inferido sobre todos os cálculos que, quando o espaço livre de coque existe, com baixa espessura, o refratário da base do alto-forno pode sofrer erosões mecânicas devido a alta velocidade de gusa nessa região.

Negro *et al.*<sup>(39)</sup> apresentaram uma caracterização da permeabilidade na zona baixa do alto-forno, correspondente a resultados de comparações de trabalhos experimentais e modelos matemáticos.

Uma sonda de 300 mm de diâmetro foi inserida pela ventaneira do AF2 de Sollac Fos, durante a parada. Após resfriamento essa sonda foi aberta, verificando-se que foram coletados materiais visualmente separados em diferentes zonas, como *raceway*, *bird nest* e homem morto. Cada uma dessas partes foi também dividida em segmentos de 20 cm a 30 cm para separação de materiais para análise química e distribuição de tamanho.

Durante a operação do forno foram feitas amostragens de líquidos e de finos, introduzidos traçadores radioativos em posições definidas, amostrados alguns gases e medidas temperaturas de alguns materiais usando pirômetro.

Foi observado que com o aumento da taxa de injeção, algumas mudanças aparecem nas características dos materiais dentro do cadinho, dentre elas se destacam: a maior degradação do coque, devido ao maior tempo de residência e maior solitação mecânica; a zona de finos (0 mm a 10 mm) a qual pode ser maior que 50%, aparece e se torna maior entre o *bird nest* e o homem morto; diminuição da profundidade do *raceway*.

Para melhor entendimento, foram coletadas amostras de diferentes localizações dos líquidos no sentido radial. Os resultados deste trabalho mostraram que a vazão máxima dos líquidos, escória ou metal, existe no homem morto, logo atrás do *bird nest*. Com produtividade constante, um aumento na injeção leva a um significativo aumento do fluxo de líquidos nos limites do homem morto.

É possível observar uma variação simultânea entre a vazão do gusa e da escória na descida ao cadinho e a vazão de finos de injeção. Uma indicação importante da baixa permeabilidade da região do homem morto, o que pode levar a um limite de produtividade, (figura 3.20).

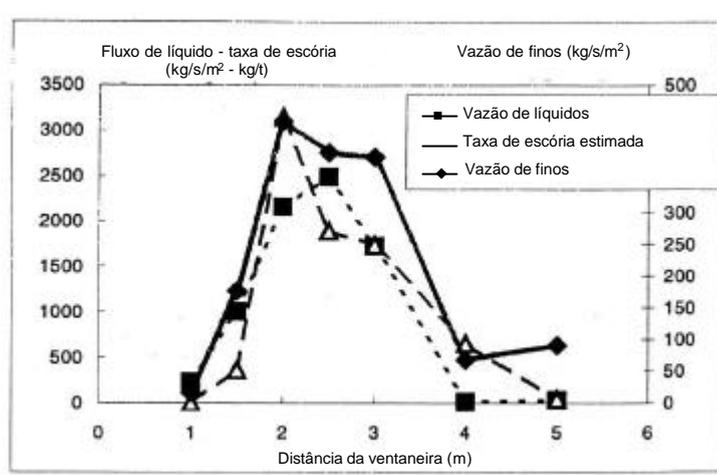


Figura 3.20 – Análise dos líquidos e amostragem dos finos ao longo do raio<sup>(39)</sup>.

Utilizando então traçadores radioativos no homem morto foi possível identificar as regiões com diferente permeabilidade, (figuras 3.21 e 3.22), sendo que essa propriedade se apresentou elevada na zona periférica, muito baixa na zona central e uma zona intermediária.

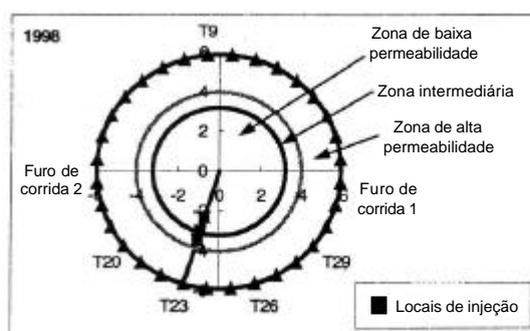


Figura 3.21 – Diferentes áreas no cadinho<sup>(39)</sup>.

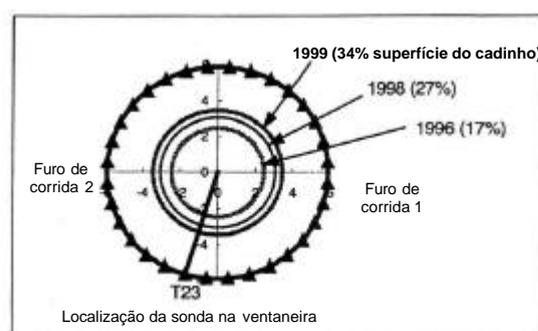


Figura 3.22 – Aumento da zona de baixa permeabilidade<sup>(39)</sup>.

Quando a zona impermeável se torna mais larga, maiores mudanças nos resultados experimentais são observados. Ocorre maior retenção do líquido, independente da distância do material ao furo de corrida. Disso pode-se concluir que, quando a zona central com baixa permeabilidade se torna mais larga, a permeabilidade na zona periférica fica insuficiente para a drenagem completa do cadinho.

Neste mesmo estudo, foi realizada a média do perfil de temperatura que possibilita distinguir diferentes zonas ao longo do raio (figura 3.23). O *raceway* apresenta profundidade de aproximadamente 1 m e pode ser dividido em duas partes. A primeira chamada de livre, onde a fração de vazios é elevada, apresenta temperatura quase constante e muito alta (1700°C a 2000°C). Em oposição a isso, na segunda parte do *raceway*, a temperatura diminui muito drasticamente e chega a aproximadamente 1400°C. Essa região deve corresponder ao final do *raceway* com uma fração de vazios muito menor, onde o coque se move facilmente como em um tambor; O *bird nest* se localiza de 1 m a 2 m da ventaneira, com temperatura entre 1350°C e 1500°C, próxima à temperatura do metal; e no homem morto a temperatura varia de 1400°C a 1000°C.

Foi observada uma zona fria a aproximadamente 3 m da ventaneira. Por meio da medida com traçadores radioativos, foi observada uma demora na saída do material vindo dessa região, o que significa que ela corresponde ao início da zona impermeável, (figura 3.24). Desta forma, pode-se dizer que a determinação do perfil de temperatura do homem morto pode fornecer boas informações sobre a permeabilidade do cadinho e a posição da zona impermeável.

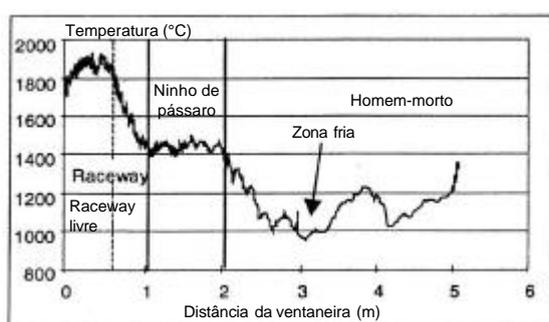


Figura 3.23 – Exemplos de perfil de temperatura observado em diferentes zonas<sup>(39)</sup>.

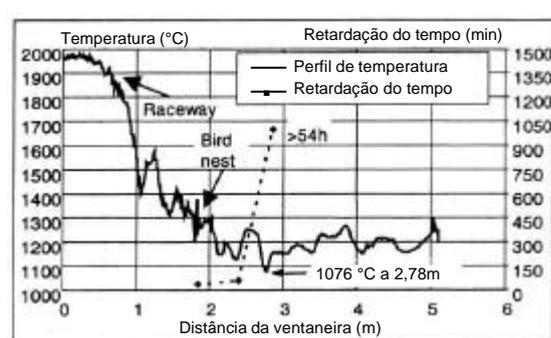


Figura 3.24 – Temperatura e tempo de residência no nível das ventaneiras do AF1-Fos<sup>(39)</sup>.

Quanto à qualidade do coque, pode-se observar que à medida em que se utiliza coque de

elevado CSR (elevação da qualidade do dia 25/01 até o dia 28/01), se observa que a temperatura mínima correspondente à zona fria se move para o centro do forno e desaparece depois de alguns dias. Isso mostra um aumento na permeabilidade e maior atividade do homem morto, (figura 3.25).

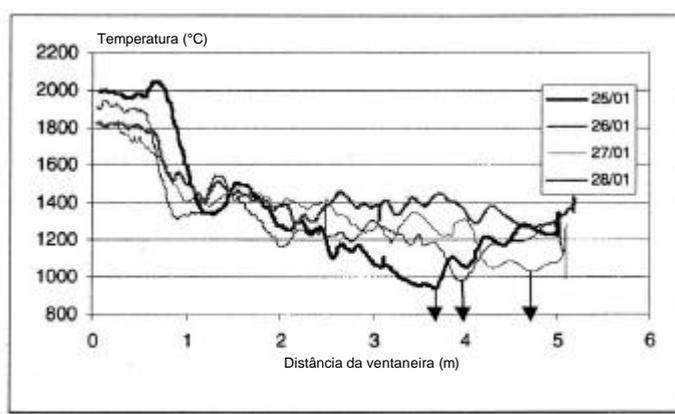


Figura 3.25 – Exemplo do perfil de temperatura no nível da ventaneira durante aumento no CSR da carga de coque<sup>(39)</sup>.

Os resultados do intenso trabalho de Negro *et al.*<sup>(39)</sup> são confirmados também no estudo realizado por Chew *et al.*<sup>(19)</sup>. O fluxo de líquidos no cadinho apresenta baixa velocidade superficial, pouca molhabilidade do sólido e a presença de dois líquidos com elevada diferença em propriedades físicas. Além disso, enquanto o alto-forno deve ser macroscopicamente caracterizado como um reator em contracorrente, a região das ventaneiras e da zona coesiva ocorre um forte fluxo radial de gás e por conseguinte do líquido.

Na zona inferior do alto-forno, gusa líquido e escória descendentes da zona coesiva têm que coexistir com gases ascendentes provenientes da queima do coque. Esses líquidos obedecem às regras de escoamento no alto-forno, transportando massa e energia, sofrem transformações físicas e químicas e são redistribuídas durante a descida ao cadinho enquanto diminuem e redistribuem o fluxo de gás<sup>(19)</sup>.

Quando o fluxo de gás é introduzido em contracorrente ao fluxo de líquido, um arraste para cima se opõe à força gravitacional drenando a camada de coque, com aumento de arraste do líquido. Por outro lado, esse fenômeno implica na ocupação dos espaços vazios que poderiam ser utilizados pelo gás. Desta forma, há um aumento na resistência ao fluxo. A competição pelo espaço e, conseqüentemente, a velocidade superficial do gás se torna muito alta, a drenagem de líquidos é impedida e a condição de inundação

ocorre, ( figura 3.26).

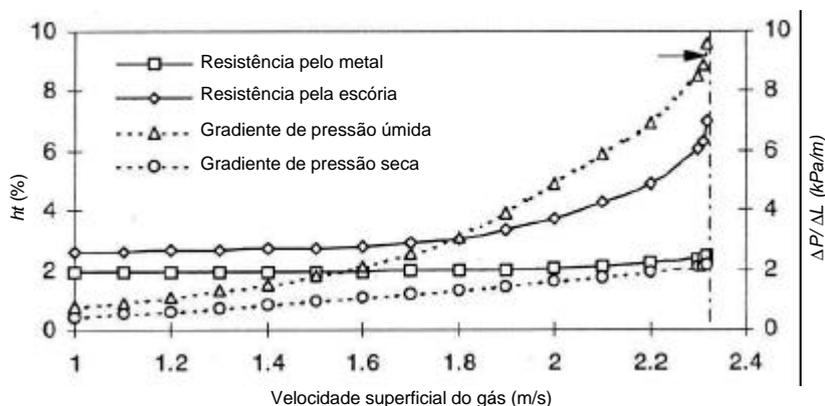


Figura 3.26 – Efeito da velocidade superficial dos gases no arraste de líquidos e o gradiente de pressão no alto-forno<sup>(19)</sup>.

A drenagem dos líquidos através da camada de coque já se torna difícil bem antes dos espaços serem completamente ocupados pelo líquido. Além disso, o gradiente de pressão do gás é significativamente alterado.

Em outra possível forma de distribuição de gusa e escória na entrada do cadinho, identificada pelo modelo de Chew *et al.*<sup>(19)</sup>, (figura 3.27), se vê quatro importantes características dos fluidos: baixo fluxo no centro do forno devido a menor carga metálica nessa região; alta taxa de líquidos na metade do raio, correspondendo ao gotejamento da zona coesiva; baixo fluxo na região do *raceway* devido ao efeito de arraste do gás sobre o líquido descendente, e elevado fluxo na parede, devido ao efeito da geometria do forno e do arraste do gás. Acredita-se que este fluido posteriormente passa pela região do *raceway*. O efeito do gás é mais intenso na escória que no metal, com uma região “seca” gerada abaixo do *raceway*.

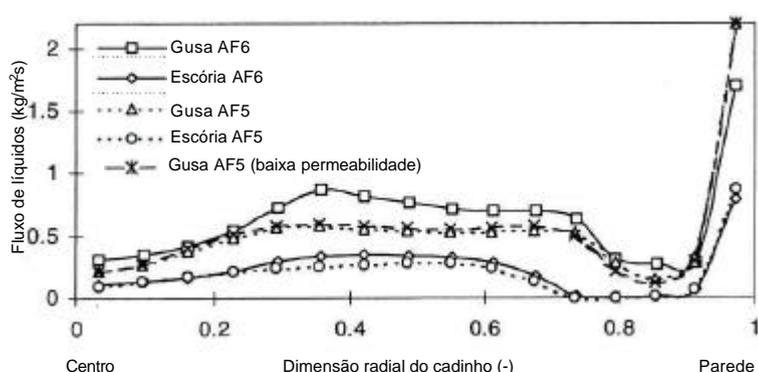


Figura 3.27 – Predição do fluxo de líquidos na entrada do cadinho<sup>(19)</sup>.

Um resultado interessante, identificado por Zhou *et al.*<sup>(49)</sup>, foi a diferença de temperatura do líquido entre os dois lados do cadinho. Acredita-se que esse fato seja devido a perda de calor para a parede ao se deslocar no sentido do furo de gusa. Desta forma, aumentando a permeabilidade do coque, a distribuição de temperatura muda consideravelmente. Além disso, no caso de homem morto permeável, a erosão fica mais concentrada no centro e não nas paredes, porque o metal passa pelo interior do cadinho.

### 3.5.5 Descrição do Modelo Matemático

Conforme já foi descrito neste trabalho, acredita-se que o fluxo de líquidos, bem como a camada livre de coque, são fatores de extrema importância nos fenômenos de erosão dos blocos refratários. Em estimativas desse desgaste no cadinho, dois mecanismos se destacam: solução química e erosão termo-mecânica. Em cada caso, é muito importante entender o fluxo de líquidos no cadinho e a transferência de energia através do leito de coque, material líquido e refratário<sup>(23)</sup>.

O modelo, previamente desenvolvido, é tridimensional, leva em consideração a fração de vazios no interior do cadinho, e pode mostrar a forte influência do coque no fluxo. Uma vez que a existência, ou não, de uma camada isenta de sólidos afeta profundamente o fluxo do gusa no cadinho, o modelo permite avaliar o perfil de velocidades para diferentes situações de permeabilidade e de assentamento do homem morto. Utiliza como dados de entrada a descrição do estado interno do cadinho, propriedades dos materiais sólidos e líquidos, condições operacionais do alto-forno e uma equação de evolução da vazão de gusa. É baseado nas equações matemáticas de Navier-Stokes e Carman.

A forma geral da equação de conservação utilizada no modelo matemático transiente, multidimensional e multifásico é dado pela equação 3.20. O índice (*i*) representa a fase a ser considerada na solução. O coeficiente de transferência ( $\Gamma_\phi$ ) representa o produto da difusividade pela massa específica, e assume diferente significado para cada variável dependente. No cálculo de velocidade, ele assume a viscosidade dinâmica e na equação de conservação de energia é dado pela razão entre condutividade térmica (*k*) e capacidade calorífica (*C<sub>p</sub>*).

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_i\phi_i)}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon\rho_i\mathbf{u}_i\phi_i - \varepsilon\Gamma_{\phi_i} \text{grad } \phi_i) = S_{\phi_i} \quad (3.20)$$

O primeiro termo dessa equação representa o regime transiente; o segundo, a convecção; o terceiro, a difusão; e do outro lado da igualdade o termo fonte.

Sendo,

$t$  - tempo (s);

$\mathbf{u}_i$  - velocidade (m/s);

$\varepsilon$  - fração de vazios do leito (-);

$\Gamma_{\phi}$  - coeficiente de transferência da variável (-);

$\rho_i$  - densidade da fase ( $\text{kg/m}^3$ );

$\phi$  - variável, temperatura ou velocidade, resolvida pelo modelo.

Para representar o termo fonte foi considerada a transferência de momento entre o sólido e o líquido, que é dada pela equação 3.21.

$$\vec{F}_s^i = \frac{\rho_i}{r_h} \left| \vec{U}_i - \vec{U}_s \right| \left( 5\beta + 0.4\beta^{0.1} \right) \left( \vec{U}_i - \vec{U}_s \right) \quad (3.21)$$

$$\text{sendo, } \beta = \frac{\mu_i}{\rho_i \left| \vec{U}_i - \vec{U}_s \right| r_h}; \quad r_h = \frac{\varepsilon \phi_s d_s}{6\varepsilon_s}$$

Em que,

$\vec{F}_s^i$  - transferência de momento entre sólidos e líquidos (N);

$d_s$  - diâmetro do sólido (mm);

$r_h$  - raio hidráulico (m);

$\vec{U}_i$  - vetor de velocidade de entrada (m/s);

$\vec{U}_s$  - vetor de velocidade de saída (m/s);

$\varepsilon_s$  - fração de vazios do sólido (-);

$\phi_s$  - fator de forma do sólido (-);

$\beta$  - coeficiente de arraste hidrodinâmico (-);

$\mu_i$  - viscosidade da escória (Poise).

A transferência de energia, para relacionar a movimentação dos líquidos com suas

temperaturas, é apresentada pela equação 3.22.

$$\dot{Q} = h_{s-i} A_{si} (T_s - T_l) \quad (3.22)$$

sendo,

$$\frac{1}{h_{s-i}} = \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_i}; \quad A_{si} = \sum_m f_m \frac{6e_m}{d_m j_m}$$

$$h_s = 2 \sqrt{\frac{k_s C_p \rho_s \left| \vec{U}_i - \vec{U}_s \right|}{\pi d_s}}; \quad h_i = \frac{k_i}{d_s} \left[ \frac{2 \sqrt{\text{Re}_{s-i} \text{Pr}_i}}{1.55 \sqrt{\text{Pr}_i} + 3.09 \sqrt{0.372 - 0.15 \text{Pr}_i}} \right]$$

Em que,

$C_p$  - capacidade térmica do sólido (J/kg °C);

$k_i$  - condutividade térmica dos materiais, i – líquido, s – sólido (W/mK);

$h_i$  - coeficiente de troca de calor na superfície dos líquidos (W/m<sup>2</sup>K);

$h_s$  - coeficiente de troca de calor na superfície do sólido (W/m<sup>2</sup>K);

$h_{i-s}$  - coeficiente de troca de calor entre líquidos e sólido (W/m<sup>2</sup>K);

Pr - número de Prandtl (-);

Q - energia (W);

$\text{Re}_{s-i}$  - número de Reynolds (-).

O cadinho pode perfeitamente ser representado por um gride numérico do tipo *body fitted coordinate* (BFC). As equações diferenciais parciais foram discretizadas utilizando o método de volumes finitos<sup>(50)</sup>. Para solução das equações de pressão juntamente com momento, foi utilizado o algoritmo SIMPLE<sup>(50)</sup>. Assim, seguindo a formulação do volume de controle, as diferentes equações foram integradas diretamente no domínio físico e, posteriormente, as relações entre domínio físico e computacional foram introduzidas<sup>(6)</sup>.

Cada célula do volume de controle é representada por uma molécula esquemática, (figura 3.28). A conexão entre os nós e seus vizinhos são dados pelos coeficientes da equação discretizada. Nos cálculos, assume-se que a média do valor da variável dependente prevalece em todo o volume de controle, centrado no ponto P. A notação apresentada na figura 3.28 é a seguinte: w – face oeste, e – face leste, s – face sul, n – face norte, b – fundo, t – topo. Para células de volume computacionais a notação é semelhante, na qual se aplica W – ocidental, E – oriental, S – sul, N – norte, B – fundo, e T – topo.

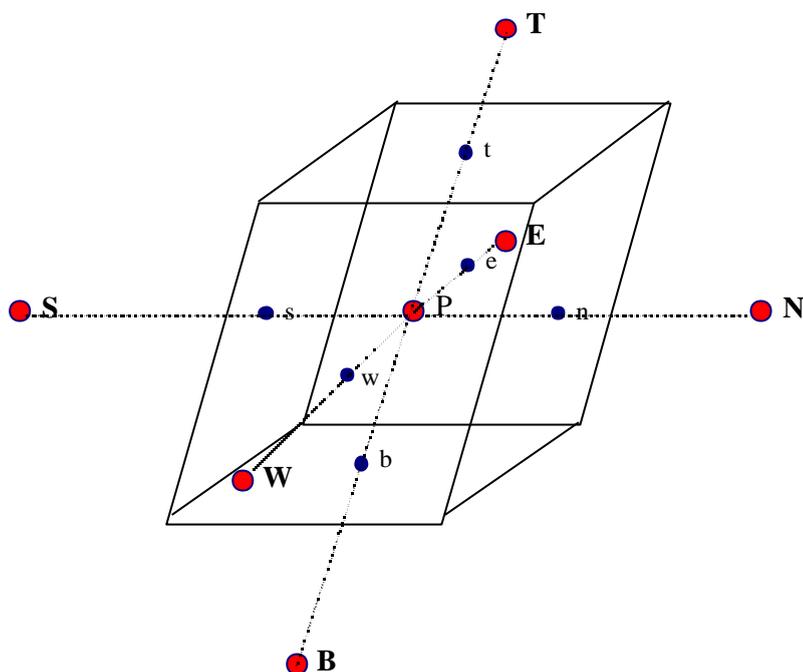


Figura 3.28 – Molécula esquemática do volume de controle em 3-D<sup>(51)</sup>.

O termo fonte contribui com o gradiente de pressão nos poros das células, criando uma queda de pressão que seja proporcional à velocidade do fluido (ou ao quadrado da velocidade) na célula. Na equação de energia, a condutividade térmica em cada ponto, é computado como a média do volume de controle da condutividade do fluido e do coque<sup>(49)</sup>.

As condições de contorno são necessárias para a solução das equações. Neste caso, foi considerada a superfície do líquido livre, com velocidade e temperaturas conhecidas na entrada. A velocidade inicial na superfície do líquido é baseada na produção média no período e assumida uniforme. A superfície superior é considerada adiabática, e não deslizamento nas paredes. Na saída do furo de gusa é considerada pressão atmosférica, e a equação de velocidade é baseada principalmente nas condições de furo do gusa, sendo implementada para permitir o balanço de massa<sup>(49)</sup>.

O modelo foi discretizado segundo a literatura<sup>(6,50,52)</sup>, e o método numérico utilizado na solução foi o de volumes finitos. Resumidamente, destacam-se as seguintes características para solução do modelo:

- ◆ uso de componente de velocidade covariante em diferentes posições;
- ◆ uso do algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) acoplando pressão e velocidade;

- ◆ método completamente implícito para discretização no tempo;
- ◆ TDMA (*Tri-diagonal Matrix Algorithm*), utilizando o método ADI (*Alternate Direction Implicit*), que converte o sistema de equações para um sistema tridiagonal, combinado com o método linha por linha.

Segundo a literatura<sup>(7,42,43)</sup>, a saída do fluido está bastante relacionada às condições do furo de gusa. Assim, para se determinar a velocidade de saída, foram assumidas algumas considerações. O furo de gusa, considerado como um tubo, permitiu que se determinasse o fator de fricção segundo a equação 3.23.

$$f = \frac{0,0626}{\left[ \log \left( \frac{e}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (3.23)$$

sendo,

D - diâmetro do furo de gusa (m);

e - rugosidade (m);

f - fator de fricção (-);

Re - número de Reynolds (-).

A equação da velocidade pode ser expressa como sendo<sup>(7)</sup>:

$$u = \sqrt{\frac{2 \left( gh + \frac{P}{r} \right)}{1 + 2f \frac{L}{D}}} \quad (3.24)$$

Em que,

g - gravidade (m/s<sup>2</sup>);

h - altura de material líquido no cadinho (m);

L - comprimento do furo de gusa (m);

r - densidade (kg/m<sup>3</sup>);

P - pressão interna do alto-forno (Pa);

u - velocidade de saída (m/s).

E, multiplicando a equação da velocidade pela área do furo de gusa, pode-se obter a equação da vazão de saída do líquido, equação 3.25.

$$Q = \frac{pD^2}{4} \sqrt{\frac{2\left(gh + \frac{P}{r}\right)}{1 + 2f\frac{L}{D}}} \quad (3.25)$$

Em que,

Q - vazão de saída de líquidos (m<sup>3</sup>/s).

Lembrando que, além da altura de líquido no cadinho, o diâmetro do furo de gusa varia com o tempo, segundo a equação 3.26.

$$D = D_i + (D_f - D_i) \times \left[ 1 - \exp\left(-1,2 \times \frac{t}{t_R}\right) \right] \quad (3.26)$$

Sendo,

D<sub>i</sub> - diâmetro inicial do furo de gusa (mm);

D<sub>f</sub> - diâmetro final do furo de gusa (mm);

t - tempo de corrida (min);

t<sub>R</sub> - tempo total de corrida (min).

O valor 1,2 foi estimado, a partir do perfil de desgaste de massa refratária encontrado na literatura<sup>(7)</sup>.

Baseado então nas variáveis de entrada e nas equações apresentadas, o modelo calcula e apresenta, em tabelas de arquivos do tipo “dat”, resultados de temperatura, velocidade, pressão e tempo de residência, conforme seu fluxo esquemático, (figura 3.29).

Assim, no presente projeto estudou-se o modelo e sua solução. Além disso, foi realizada a adequação e validação deste modelo para o AF3 da Usiminas, identificando a aplicabilidade das equações utilizadas.

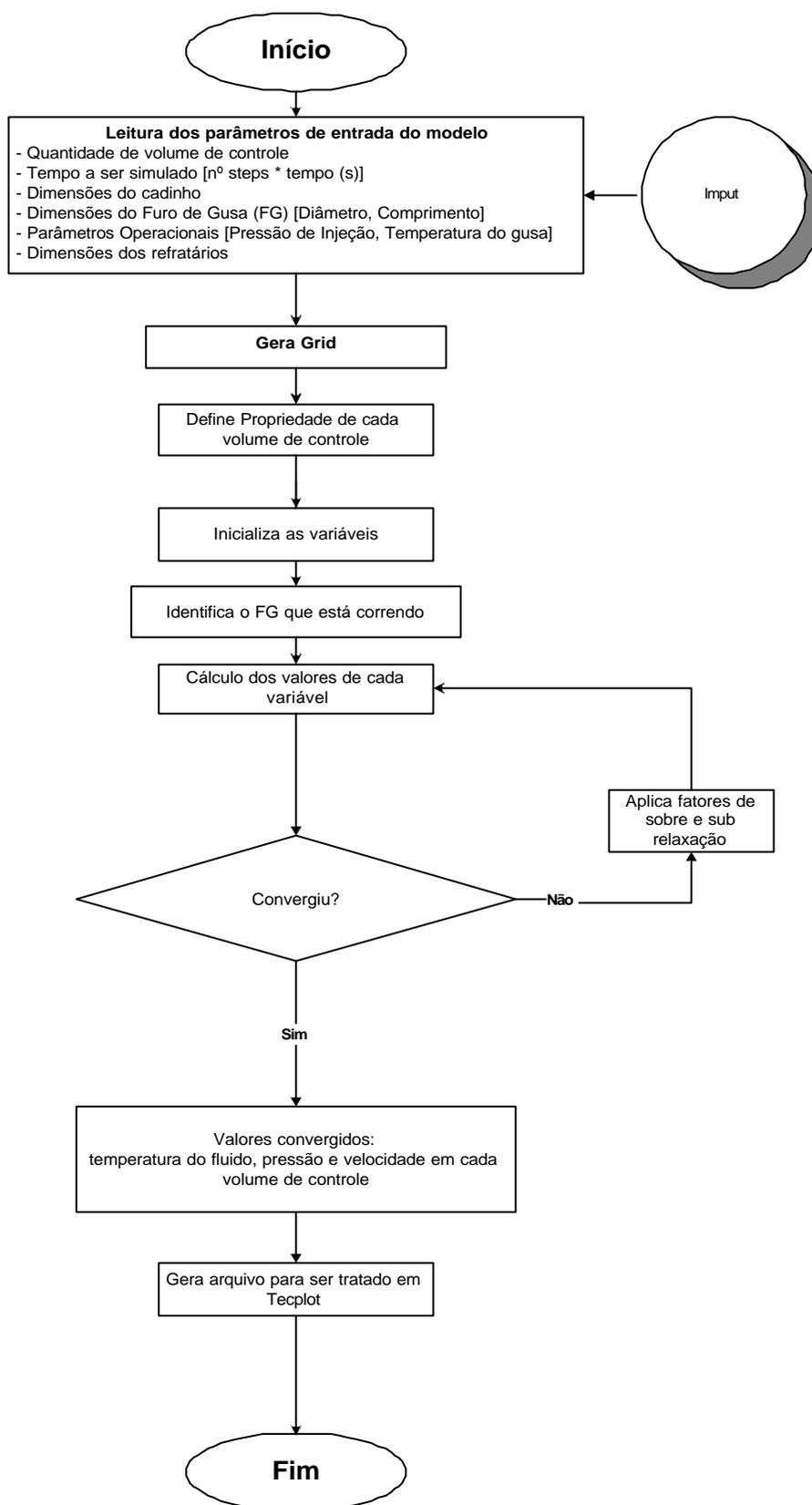


Figura 3.29 – Fluxo esquemático do modelo.

## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 Modelo Matemático**

Para a adequação e aplicação do modelo foram desenvolvidas as seguintes etapas:

- a) escolha de um alto-forno, onde o modelo é aplicado;
- b) avaliação das informações necessárias do alto-forno;
- c) determinação da flutuação do homem morto;
- d) entendimento, adequação e aplicação do modelo matemático proposto.

Cada etapa será descrita em detalhes a seguir.

### **4.2 Escolha do Alto-Forno**

O ideal é poder trabalhar com um alto-forno que tenha a estrutura mais próxima possível da necessária para a utilização de um modelo de controle. Considerando que uma maior produtividade do forno implica numa maior necessidade de controle do seu esgotamento, optou-se pelo desenvolvimento do modelo para o AF3 da Usiminas. Além disso, esse forno contém um melhor nível de instrumentação o que facilita a validação do modelo.

### **4.3 Informações Necessárias**

O controle de esgotamento atualmente utilizado no AF3 da Usiminas se baseia exclusivamente no balanço de massa da carga metálica. Todavia, para o desenvolvimento do modelo de fluxo de líquidos serão utilizadas informações adicionais que já são de controle da operação, com exceção do controle de vazão de gusa, atualmente em fase de implementação, o que refinará o controle de esgotamento.

#### 4.4 Determinação da Flutuação do Homem Morto

Sabe-se que a distância entre o fundo do cadinho e o início da coluna de coque pode sofrer alterações durante o processo devido à quantidade de material líquido dentro do cadinho e, conseqüentemente, à força de empuxo<sup>(25)</sup>, além das demais variáveis que atuam no núcleo do alto-forno. Assim, baseado no balanço de forças atuando no homem morto, foi realizado, em Excel<sup>®</sup>, um modelo simplificado que determina a flutuação, ou não, do homem morto, em função das condições operacionais do forno no início de cada corrida, tabela IV.1.

Tabela IV.1 – Balanço de forças para determinação da flutuação do homem morto.

<b>FORÇAS ATUANDO</b>	
<b>PARA BAIXO</b>	<b>PARA CIMA</b>
<b>Peso do material sólido</b> Força = massa * gravidade	<b>Pressão do ar injetado pelas ventaneiras</b> F = pressão de injeção * área no ventre
<b>Contra-pressão no topo</b> Força = pressão no topo * área da goela	<b>Força de empuxo do líquido</b> F = densidade do gusa * volume deslocado * g
<b>Volume ocupado pelo homem morto</b> F = m*g m = densidade do coque*V V = área do cadinho * H H = altura total (ventaneira até fundo) x = flutuação do homem morto F = densidade do coque * $([D_{\text{cadinho}}-2*D_{\text{raceway}}]^2)/4*\Pi*[H-x]*g$	

#### 4.5 Entendimento, Adequação e Aplicação do Modelo Matemático Proposto

O entendimento e a adequação do modelo propriamente dito é dividido nas seguintes partes:

- ◆ *compreensão dos aspectos internos do alto-forno* – identificação, delimitação e ponderações sobre os fenômenos físico-químicos a serem considerados, assim como a geometria e condições de interface nas fronteiras do domínio;

- ◆ *adequação do modelo matemático* – após entendimento da formulação matemática já desenvolvida, foi realizada adequação das condições de contorno para que melhor representem os fenômenos definidos anteriormente, no AF3 da Usiminas;
- ◆ *solução do modelo matemático* – devido à complexidade normalmente atingida, raramente é possível a utilização de métodos analíticos para a solução das equações. No caso do modelo desenvolvido, a solução das equações foi possível com o auxílio de métodos numéricos;
- ◆ *implementação das soluções numéricas* – consiste na codificação, em linguagem computacional adequada, dos algoritmos de solução numérica escolhidos para a resolução dos modelos matemáticos. O algoritmo utilizado na solução das principais equações do modelo foi o SIMPLE, segundo Patankar<sup>(50)</sup>.
- ◆ *simulações preliminares* – nesta fase, buscou-se obtenção de resultados/soluções do modelo que satisfaçam alguns critérios preestabelecidos pelo senso comum a respeito do processo em questão, ou através de dados previamente estabelecidos. A simulação, além de possibilitar possíveis acertos das ferramentas desenvolvidas, é utilizada para avaliação da precisão e periodicidade das informações coletadas;
  - ✓ as variáveis de entrada no modelo são: i) produção diária do alto-forno; ii) situação do homem morto no cadinho; iii) propriedades do líquido (viscosidade, densidade, temperatura); iv) diâmetro do coque no cadinho; v) condições operacionais (por exemplo, pressão de injeção do ar, pressão de topo, diâmetro e comprimento do furo de gusa).
  - ✓ as variáveis de saída do modelo são: i) velocidade e temperatura do líquido em cada ponto no interior do cadinho; ii) comportamento do fluido no interior do cadinho; iii) tempo de residência do material líquido;
- ◆ *ajuste de parâmetros* – os resultados de simulação foram comparados com dados operacionais do processo, buscando-se a identificação de discrepâncias, suas causas e, se possível, a sua correção através de ajustes de parâmetros do modelo matemático;
- ◆ *validação* – com os resultados da simulação do modelo é possível se realizar uma comparação com a operação do alto-forno. São discutidas as dificuldades e vantagens do uso do modelo, verificando sua aplicabilidade e representatividade. Para esse modelo, a validação foi realizada pela vazão média de saída.

## 5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 Índice Máximo de Enchimento do Cadinho

Antes de se aplicar efetivamente o modelo, a fim de destacar a importância do controle da drenagem no cadinho, principalmente no caso de altos-fornos com elevada produtividade, foi calculado o tempo máximo que se pode ter entre o final de um vazamento e o início da corrida seguinte, sem alterar a operação do AF3 da Usiminas. As características do AF3, bem como seus dados operacionais<sup>(53)</sup>, em média anual, utilizados neste cálculo são mostrados nas tabelas V.1 e V.2. Os valores de densidade<sup>(53)</sup> de gusa e escória utilizados nos cálculos são respectivamente 6700 kg/m<sup>3</sup> e 2500 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela V.1 – Características do AF3 Usiminas.

Variável	Unidade	Valor
Volume Interno	m <sup>3</sup>	3163
Volume Útil	m <sup>3</sup>	2722
Diâmetro Cadinho	m	12,2
Altura do Cadinho (ventaneira até furo de gusa)	m	3,77
Altura do Furo de Gusa	m	4,31
Número de Ventaneiras	-	30
Número de Furos de Gusa	-	3
Sistema de Refrigeração	-	Staves
Topo	-	Duplo Cone
Contrapressão	g/cm <sup>2</sup>	2500

Tabela V.2 – Dados operacionais do AF3 Usiminas, média anual/2005.

Variável	Unidade	Valor
Produção	t/dia	7940*
Produtividade	t/d/m <sup>3</sup>	2,47
Slag-Rate	kg/t	263
Coke-Rate	kg/t	363
Taxa de Injeção de carvão	kg/t	138
Fuel-Rate	kg/t	501
Volume de Ar	Nm <sup>3</sup> /min	4965
Enriquecimento	%	4,16
Temperatura do Ar	°C	1150
Temperatura do Topo	°C	114
BFG gerado	Nm <sup>3</sup> /t	1536

\* Esse valor leva em consideração os dias de parada, mas não considera sua preparação.

As propriedades dos refratários do cadinho do AF3 Usiminas podem ser observadas nas tabelas V.3 e V.4. A condutividade térmica do material refratário é calculada através da equação 5.1. Os coeficientes da equação foram obtidos através de regressão simples, utilizando-se para cada material valores pré-determinados de condutividade térmica em determinadas temperaturas.

$$k = C_0 + C_1T + C_2T^2 \quad (5.1)$$

Em que,

k – condutividade térmica para dada temperatura (W/m°C);

C<sub>n</sub> – coeficientes da equação (-);

T – temperatura de trabalho (°C).

Tabela V.3 – Valores de condutividade térmica (W/m°C).

Material Refratário	Temperatura (°C)								
	100	200	400	600	700	800	1000	1100	1200
Tijolo alumina carbono carbetto de silício							3,5		
Tijolo aluminoso			2,3		1,8			1,7	
Tijolo sílico aluminoso			1,45		1,45		1,5		
Bloco de grafite	96,0	84,0	67,0	60,0		55,0		51,0	
Bloco de carbono super microporo		20,8	21,1	21,6		21,9	22,3		22,5
Bloco de carbono convencional		12,8	13,5	14,2		14,9	15,6		16,3
Bloco de carbono ultra-microporo		37,0	35,0	33,0		31,0	29,0		27,0

Tabela V.4 – Coeficientes para o cálculo da condutividade térmica dos materiais refratários do cadinho.

Material refratário	Faixa de temperatura (°C)		Coeficientes da equação de condutividade		
	Inicial	Final	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
Camada estagnada	0	1.600	5,00	-0,002963	0
Tijolo alumina carbono carbetto de silício	0	1.600	3,50	0	0
Tijolo aluminoso	0	1.600	3,53	-0,0039	2E-06
Tijolo alta alumina	0	500	1,65	0	0
	>500	1.600	1,80	0	0
Tijolo sílico aluminoso	0	1.600	1,50	-0,0020	2E-09
Bloco de grafite	0	1.600	34,87	-0,0086	2E-06
Bloco de carbono super microporo	0	1.600	20,31	0,0023	-4E-07
Bloco de carbono convencional	0	500	7,00	0,0069	0
	>500	1.600	8,14	0,0046	0
Bloco de carbono ultra-microporo	200	1.200	39,00	-0,0100	0

Esquemáticamente, é possível se observar a posição dos diferentes tipos de refratários no cadinho, bem como a sua montagem, (figura 5.1).

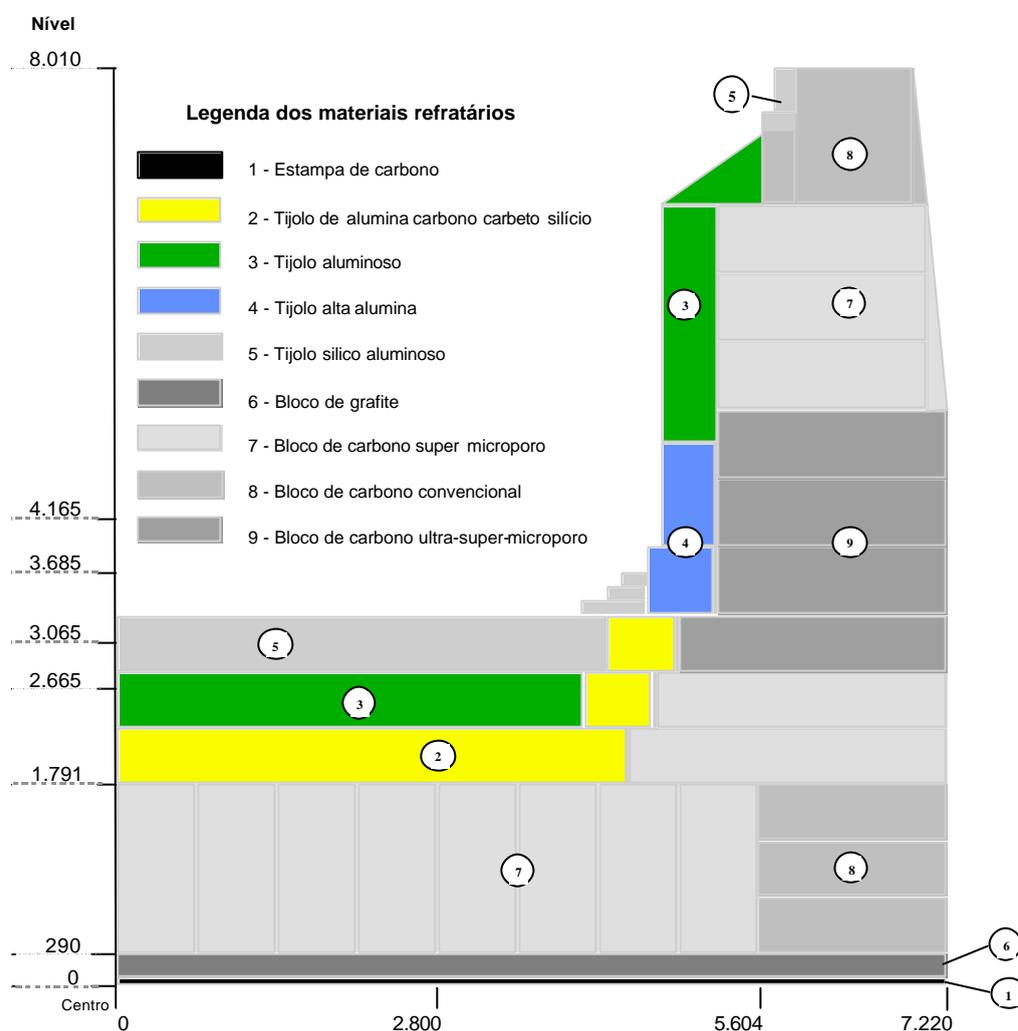


Figura 5.1 – Montagem do refratário do cadinho do AF3.

A determinação do índice máximo de enchimento do cadinho ( $E_{Cm\acute{a}x}$ ) foi feita com as seguintes considerações: i) o AF se encontra, inicialmente, completamente esgotado; ii) o máximo volume de líquido corresponde a um nível equivalente a 80% da altura entre as ventaneiras e o furo de corrida (3,02 m); iii) o volume de escória retida após o vazamento corresponde a 50% do volume efetivo do cadinho; e iv) a fração de vazios efetiva do leito de combustível é de 0,3. O percentual de volume máximo de líquidos no cadinho calculado é, então, de 12%. Acima desse valor, começarão ocorrer problemas que levam à redução na vazão de ar soprado.

Desta forma, baseado no volume disponível dentro do cadinho, que por sua vez depende

da fração de vazios e do índice máximo de enchimento ( $E_{Cmáx}$ ), foi calculada a estimativa do tempo máximo de acumulação de líquidos ( $T_{a máx}$ ) entre um vazamento e outro, sem que ocorra perturbação da operação normal do AF3 da Usiminas, tabela V.5, em função do seu ritmo de produção, (figura 5.2). Inicialmente, avaliou-se a taxa de produção de gusa em termos de volume por unidade de tempo. Por uma relação análoga, avaliou-se a taxa de produção de escória. Foi considerado um valor médio de *slag-rate*, tabela V.2, igual a 263 kg/t.

Tabela V.5 – Produção do AF3 e tempo máximo permitido entre corridas.

<b>Produção (t/d)</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/min)</b>	<b>T<sub>a máx</sub> (min)</b>
6000	1,06	49,88
7000	1,24	42,76
7200	1,27	41,57
7500	1,33	39,90
7800	1,38	38,37
7940	1,40	37,63
8000	1,41	37,41
8200	1,45	36,50
8500	1,50	35,21
9000	1,59	33,25

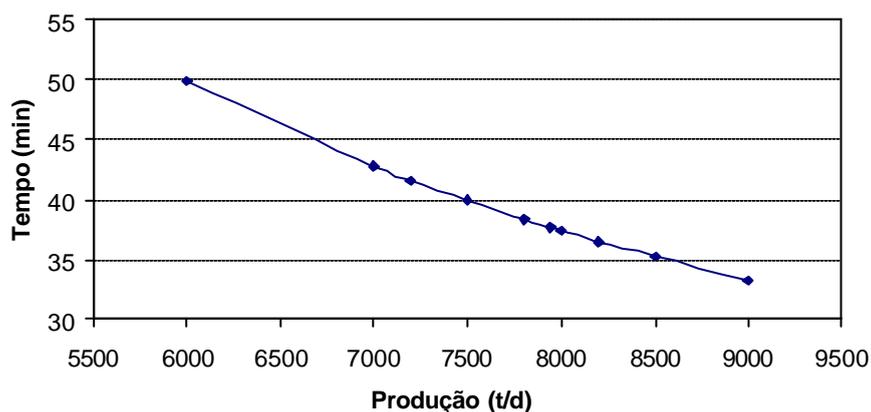


Figura 5.2 – Relação entre produção e tempo máximo permitido entre corridas.

Portanto, para uma produção média do AF3 da Usiminas de 7940 t/d, o tempo máximo que se pode ter entre um vazamento e outro, sem perturbação operacional, é de cerca de 38 min. No entanto, sabendo-se que o ritmo normal de produção deste AF é em torno de 8500 t/d, caso se observe alguma anormalidade nas áreas de corrida, fato esse que pode

obrigar ao AF a permanecer fechado, é aconselhável alteração nos parâmetros de processo antes mesmo que o tempo chegue a 30 min. Ou seja, essa informação é importante para o caso de alguma anormalidade na área de corrida do AF. No entanto, como já foi destacado na literatura consultada, o perfil de esgotamento do cadinho mostra um acúmulo de escória no centro do forno, o que leva a crer que, além de se determinar o tempo possível de retenção de material líquido no cadinho do AF com os FGs fechados, é importante se conhecer o real perfil de fluido retido no interior, que só é possível através de modelos matemáticos.

## 5.2 Flutuação do Homem Morto

Utilizando o modelo do balanço de forças, apresentado anteriormente, pode-se avaliar a influência do comprimento do *raceway*, da massa da carga, do esgotamento, da pressão de injeção do ar e da contrapressão na flutuação do homem morto, considerando uma mesma produtividade do AF, (figura 5.3). Na tabela V.6 pode-se observar os valores e o intervalo no qual foi calculada a distância entre o fundo do cadinho e o início da coluna de coque, em diferentes situações de trabalho. A condição padrão considerada, é destacada na primeira linha. A coluna “V” equivale aos valores da variável em questão, e a coluna “HM”, à distância entre o fundo do cadinho e o início da coluna de coque.

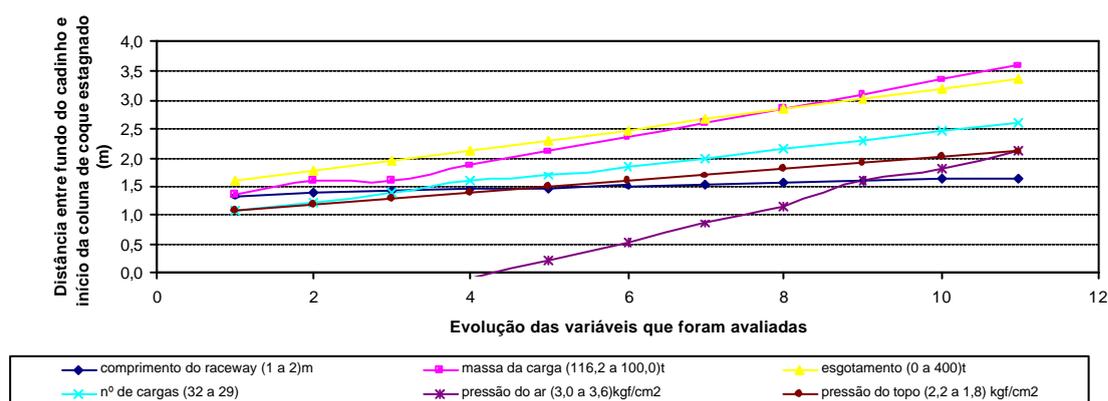


Figura 5.3 – Influência das diversas variáveis na distância entre o fundo do cadinho e ao início da coluna de coque estagnado.

Tabela V.6 – Variação da flutuação do homem morto.

Situação	Raceway (1 a 2) m		Massa da carga (116 a 100) t		Esgotamento (0 a 400) t		Nº de cargas (32 a 29)		P do ar (3,0 a 3,6) kgf/cm <sup>2</sup>		P do topo (2,2 a 1,8) kgf/cm <sup>2</sup>	
	V	HM	V	HM	V	HM	V	HM	V	HM	V	HM
<b>Padrão</b>	<b>1,8</b>	<b>1,59</b>	<b>114,5</b>	<b>1,59</b>	<b>0</b>	<b>1,59</b>	<b>31</b>	<b>1,59</b>	<b>3,50</b>	<b>1,59</b>	<b>2,00</b>	<b>1,59</b>
1	1,0	1,34	116,2	1,36	40	1,77	32,0	1,08	3,00	-1,06	2,20	1,08
2	1,1	1,38	112,9	1,60	80	1,95	31,7	1,23	3,06	-0,74	2,16	1,18
3	1,2	1,41	111,3	1,85	120	2,12	31,4	1,39	3,12	-0,42	2,12	1,28
4	1,3	1,44	109,6	2,10	160	2,30	30,8	1,69	3,18	-0,10	2,08	1,38
5	1,4	1,47	108,0	2,35	200	2,48	30,5	1,84	3,24	0,21	2,04	1,49
6	1,5	1,50	106,4	2,60	240	2,66	30,2	2,00	3,30	0,53	1,96	1,69
7	1,6	1,53	104,8	2,84	280	2,83	29,9	2,15	3,36	0,85	1,92	1,80
8	1,7	1,56	103,2	3,09	320	3,01	29,6	2,30	3,42	1,17	1,88	1,90
9	1,9	1,62	101,5	3,34	360	3,19	29,3	2,45	3,54	1,80	1,84	2,00
10	2,0	1,64	100,0	3,59	400	3,37	29,0	2,61	3,60	2,12	1,80	2,10

Por meio da figura 5.3, é possível observar que a variável que mais influencia na flutuação do homem morto é a pressão de injeção do ar, maior inclinação da reta, e o peso da carga. Em seguida, tem-se o esgotamento do cadinho, o número de cargas dentro do forno, a pressão do topo, e, em último lugar, a variação do comprimento do *raceway*. Esse fato reforça a teoria de que paradas emergenciais no AF (variação brusca da pressão de sopro) devem ser evitadas ao máximo, pois causam alteração extremamente significativa na distância entre o fundo do cadinho e o início da coluna de coque, e conseqüentemente em toda movimentação do fluido no interior do cadinho. Além disso, a composição da carga, a distribuição de minério/coque e a altura da *stok-line* influenciam consideravelmente na flutuação do homem morto.

A variação da flutuação do homem morto para o AF3 da Usiminas foi calculada, considerando um banco de dados no período de 01/08/2006 a 06/08/2006 – corridas 20130 a 20175, (figura 5.4). Além disso, foi implementado, no computador de processo, uma variável que representa o fluxo térmico na soleira do cadinho, numa tentativa de correlacionar esse fluxo com a passagem de material pelo fundo do cadinho, (figura 5.5).

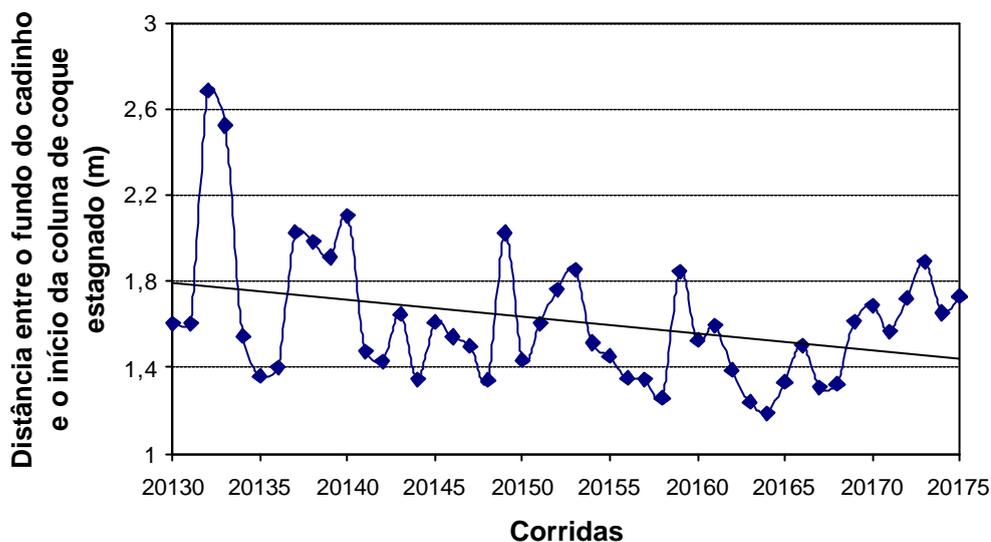


Figura 5.4 – Flutuação do homem morto, resultado por corrida.

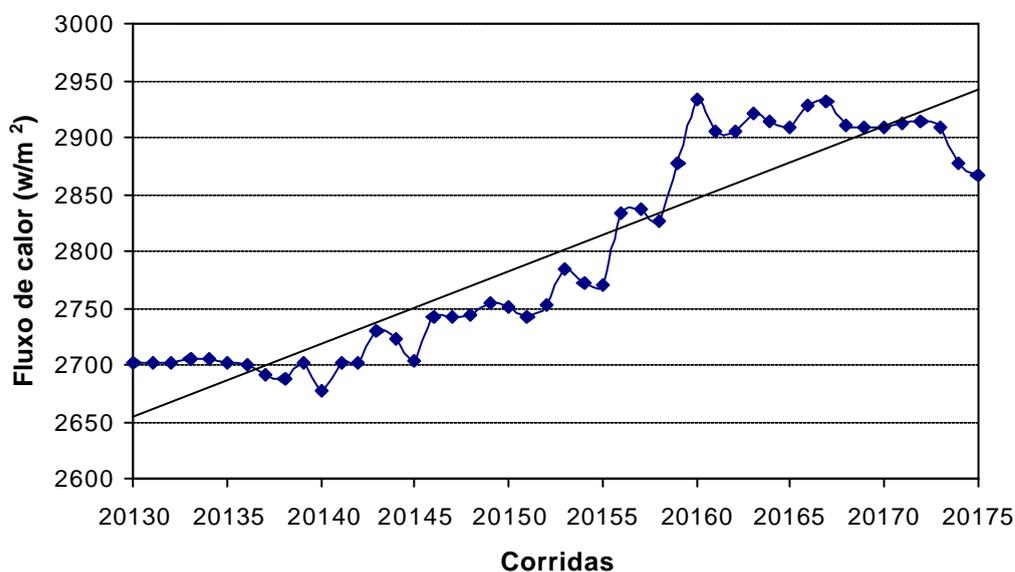


Figura 5.5 – Variação do fluxo térmico, resultado em média no início da corrida.

Ao se avaliar a figura 5.4, deve-se lembrar que, devido às considerações feitas na elaboração do modelo de flutuação do homem morto, não se pode afirmar que a flutuação seja exatamente o valor mostrado. No entanto, acredita-se que o resultado apresentado no modelo represente a tendência real do processo. Os valores de pico

podem ser explicados, principalmente, pela pressão de sopro mais elevada quando comparada aos demais resultados (figura 5.6), ou por dificuldade no esgotamento. Ao comparar essa tendência com o resultado de fluxo de calor na soleira, apresentado na figura 5.5, é possível observar uma relação entre o aumento do fluxo com a diminuição da flutuação do homem morto. Isso pode ser explicado pelo fato dessa diminuição implicar num aumento da velocidade do material no fundo do cadinho. É importante registrar que, além da flutuação do homem morto, outros fatores influenciam no fluxo de calor, inclusive, a alteração do patamar no valor do fluxo pode ser explicada por uma pequena variação da água de refrigeração realizada no dia 04/08/06, (corrida 20154).

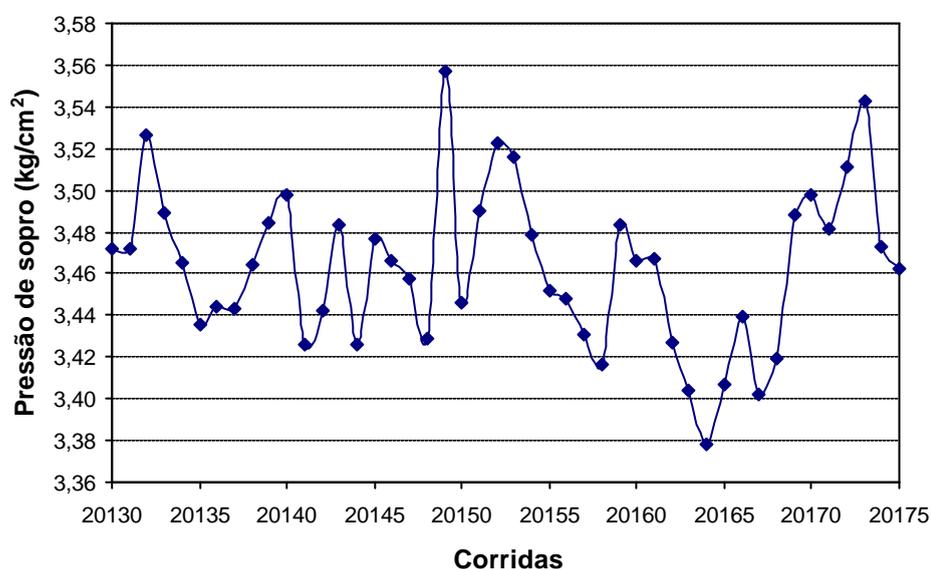


Figura 5.6 – Variação da pressão de sopro de ar quente, resultado em média no início da corrida.

### 5.3 Domínio Computacional e Geométrico

O domínio computacional inclui todo o cadinho na região inferior às ventaneiras, ou seja, refratário, líquido e homem morto. A malha é gerada para o plano XZ, (figura 5.7), em seguida é rotacionada em 360° para gerar o sólido, (figura 5.8). A região do furo de gusa é inclinada a 12° do plano horizontal, e sua representação é quadrada na secção de corte. O refinamento da malha se concentrou na região superior ao furo de gusa devido ao fato de se ter grande interesse em se avaliar o caminho do fluxo da entrada até a saída

no furo de gusa. Além disso, é uma região onde se tem maior variação do tempo de residência do material, ao longo do raio e da altura do cadinho.

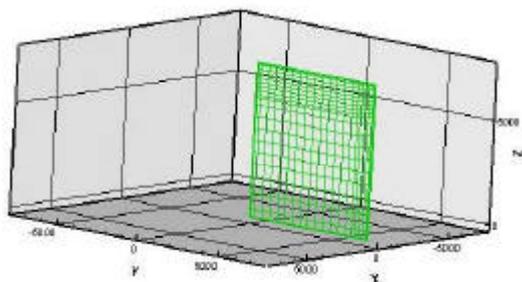


Figura 5.7 – Malha bidimensional do cadinho.

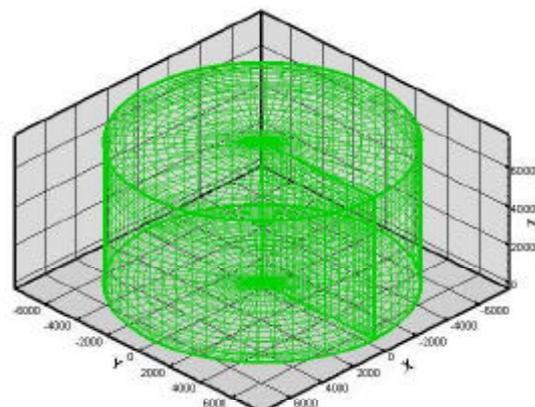


Figura 5.8 – Malha tridimensional do cadinho.

## 5.4 Condições de Cálculo

A seguinte situação foi imposta como condição de contorno:

- ◆ a superfície do gusa na entrada, com temperatura igual à da saída, é plana e horizontal, e se mantém num nível constante;
- ◆ a velocidade de entrada do líquido é uniforme, baseada no ritmo de produção do alto-forno;
- ◆ não há transferência de massa através das paredes refratárias, sendo considerada condição de não deslizamento na face quente;
- ◆ equações de entalpia e de velocidade foram utilizadas para definir condições de contorno do fluxo na saída;
- ◆ foi especificada a temperatura inicial na face fria do refratário e a sua face superior foi considerada adiabática;
- ◆ a pressão fora do furo de gusa igual a 1 atm;
- ◆ a flutuação do homem morto é considerada como sendo a altura calculada pelo balanço de forças, para cada corrida.

As condições utilizadas nos cálculos que levam aos resultados apresentados neste trabalho são destacadas na tabela V.7.

Tabela V.7 – Condição padrão para cálculo no modelo.

Variável	Unidade	Valor
Temperatura do gusa	°C	1510
Densidade do gusa	g/cm <sup>3</sup>	6700
Rugosidade do furo de gusa	mm	0,02
Diâmetro inicial do furo de gusa	mm	55 / 55 / 55
Comprimento do furo de gusa	mm	3400 / 3200 / 3000
Pressão de sopro	Pa	3,50*10 <sup>5</sup>
Pressão de saída do material	Pa	1,00*10 <sup>5</sup>
Gride	(#)	60(r)x20(z)x20(θ)
Diâmetro de coque no cadinho	mm	30

## 5.5 Validação do modelo

Em um primeiro momento, era esperado que a validação do modelo pudesse ser feita pela variação da velocidade na saída do furo de gusa. No entanto, devido a dificuldades na obtenção desses dados industrialmente, foi considerada a vazão média de saída como sendo uma alternativa para validação, (figura 5.9). Vale ressaltar que, embora tenha apresentado um erro relativamente baixo, esse valor pode ser melhorado quando se obtiver a real equação de velocidade de saída do material líquido.

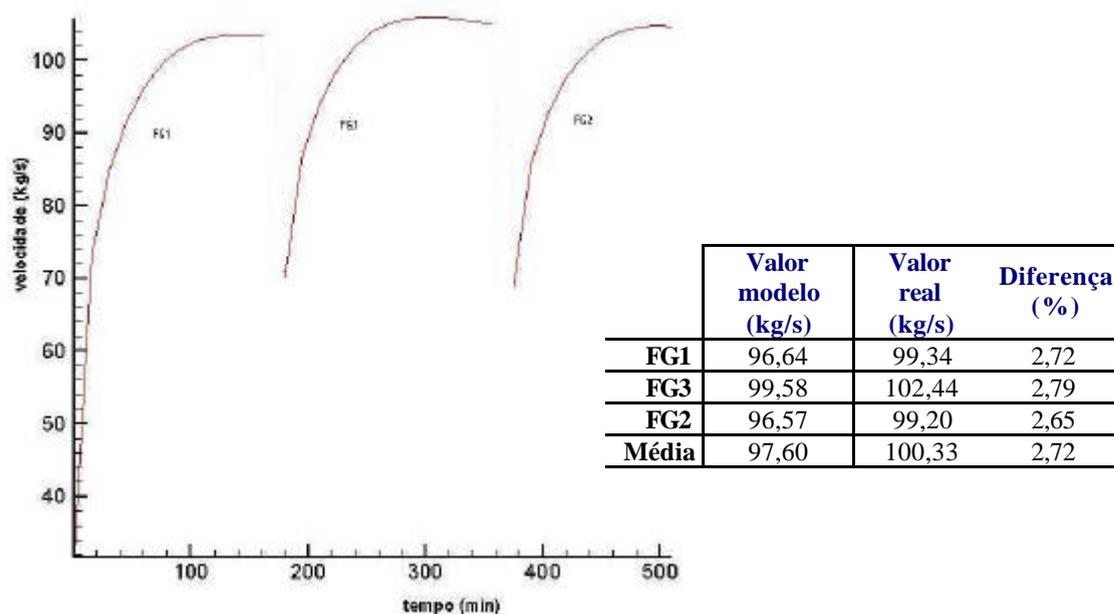
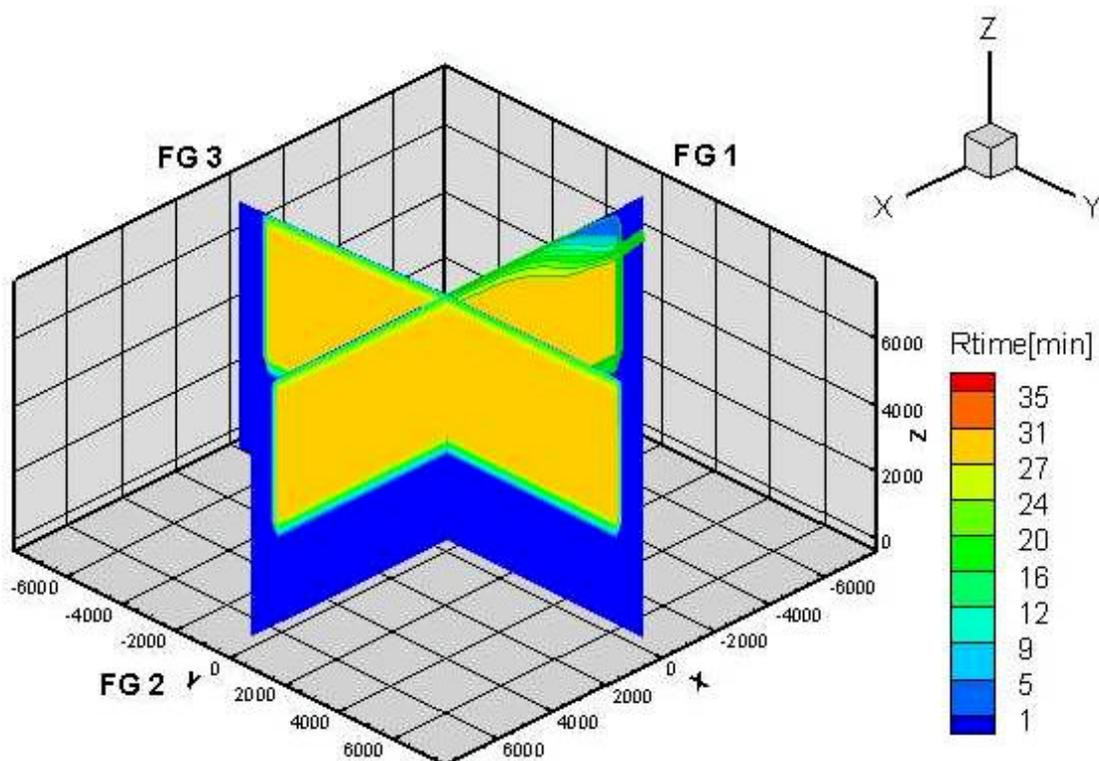


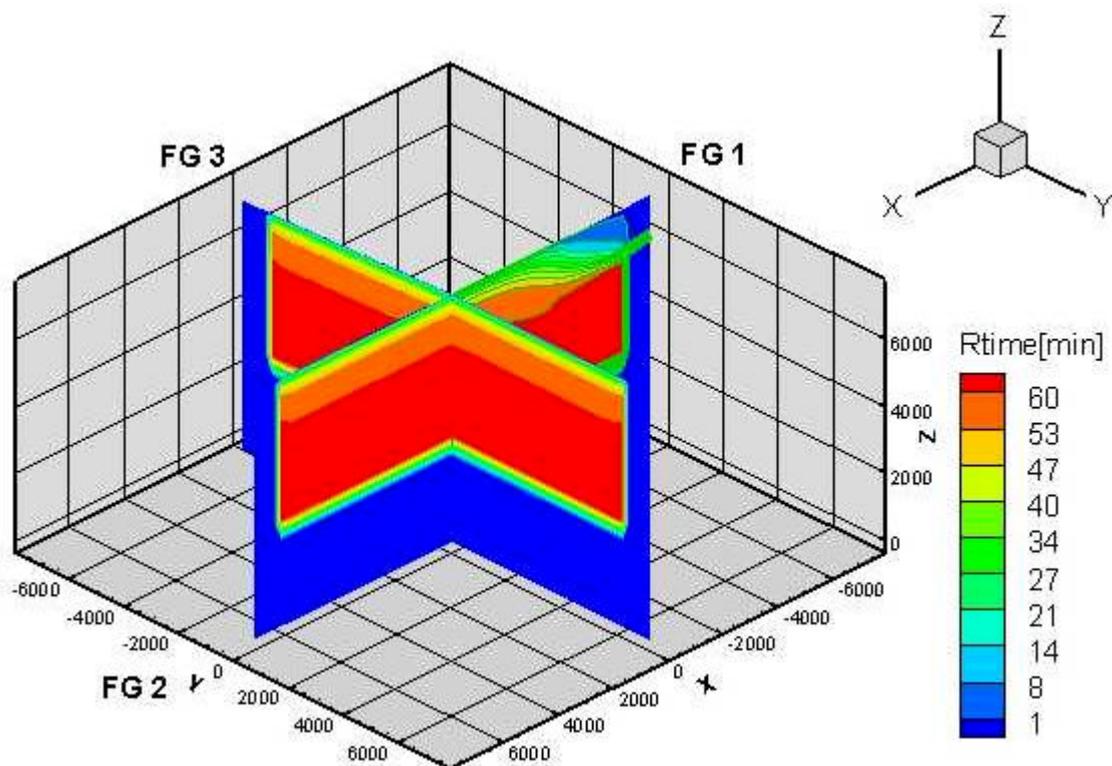
Figura 5.9 – Velocidade de saída do material no furo de gusa.

## 5.6 Fluxo de Líquidos no Cadinho

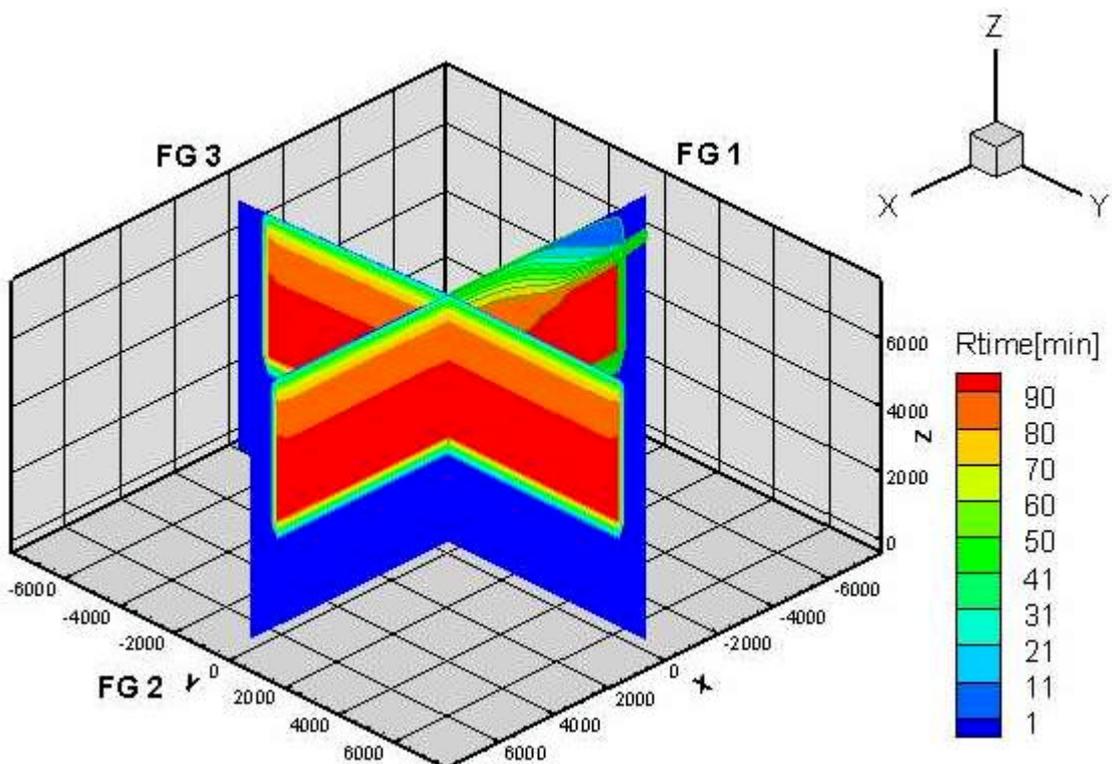
A evolução do tempo de residência do material líquido no cadinho foi obtida para uma simulação realizada num ciclo de três corridas consecutivas, utilizando-se as áreas 1, 3 e 2, respectivamente, (figura 5.10).



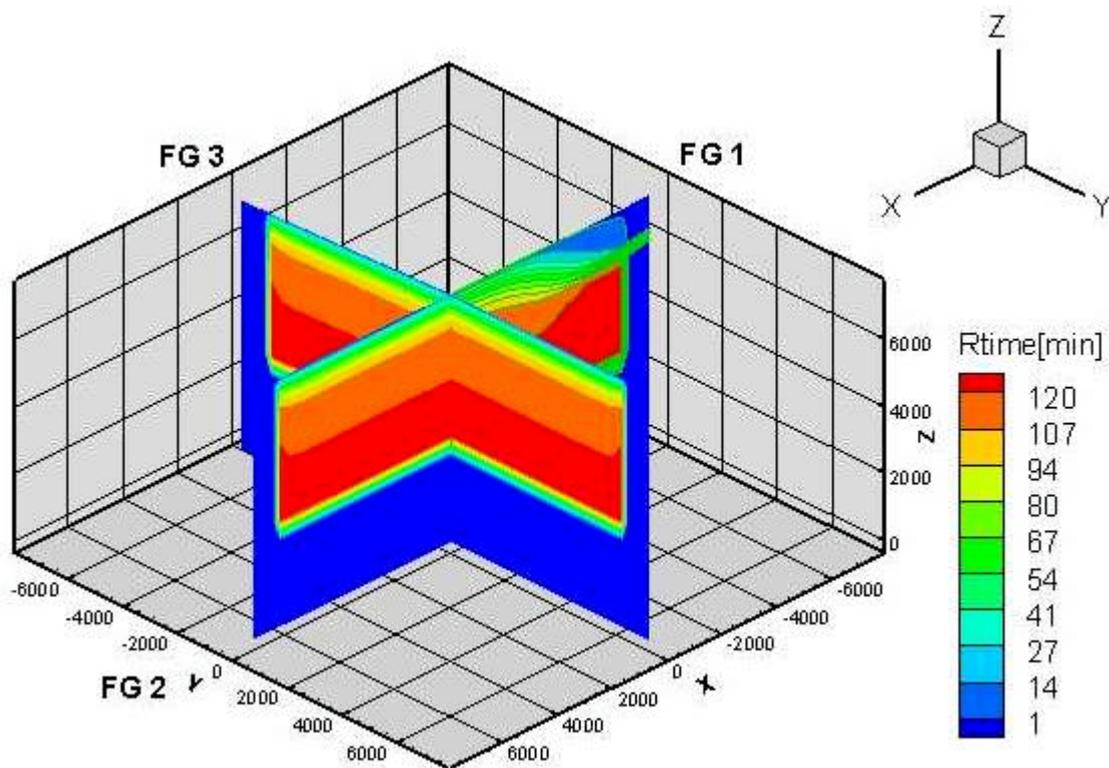
a)  $t = 30 \text{ min}$



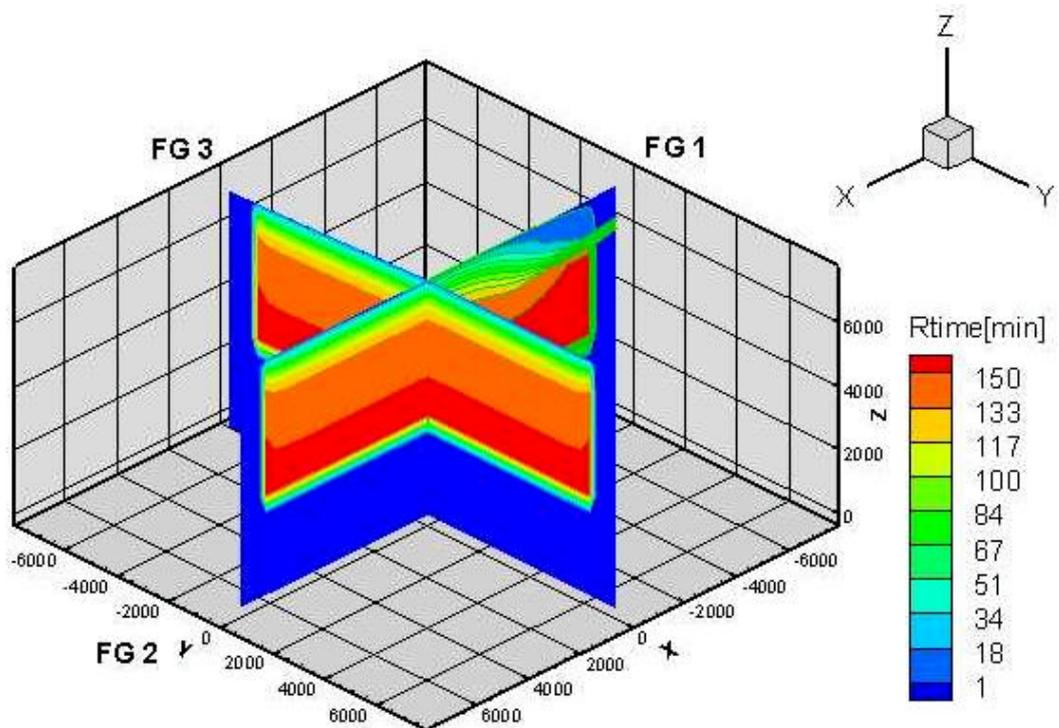
b)  $t = 60$  min



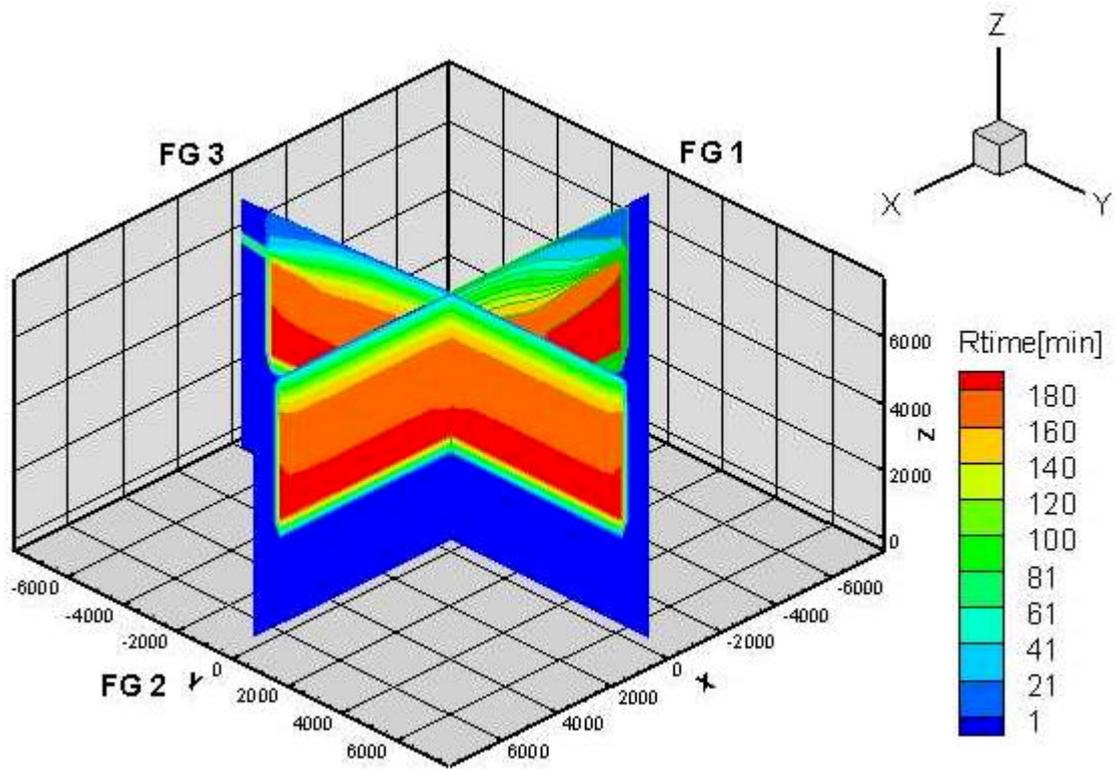
c)  $t = 90$  min



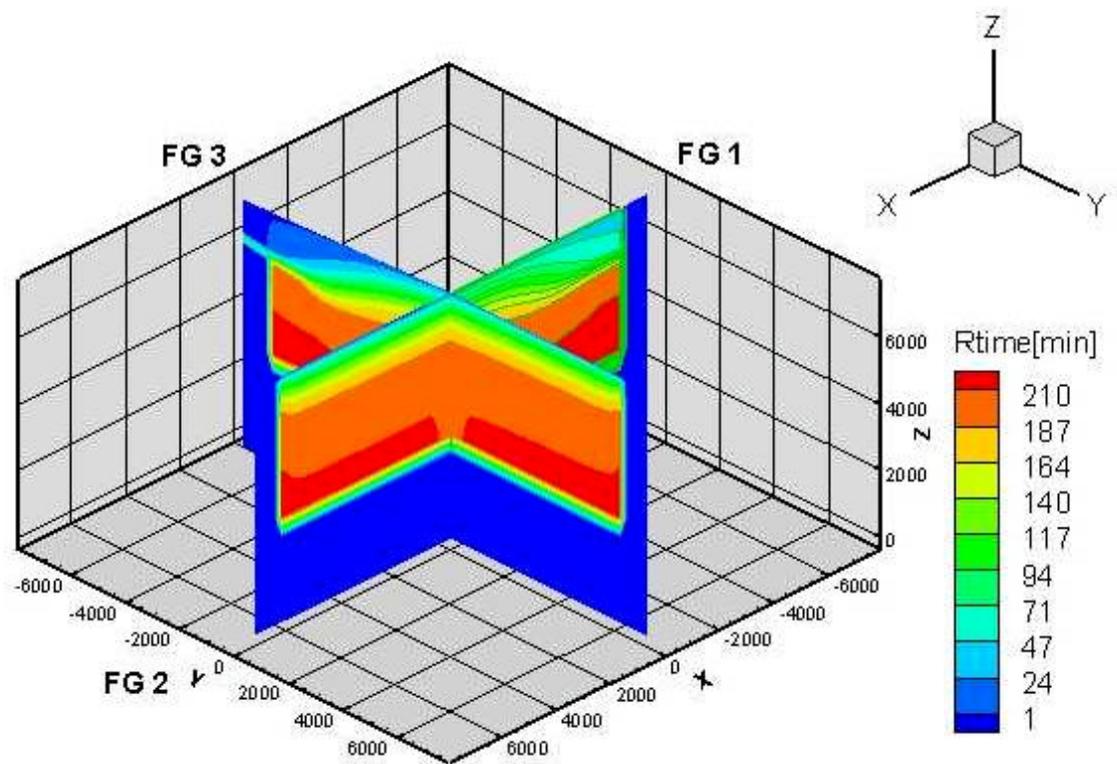
d)  $t = 120$  min



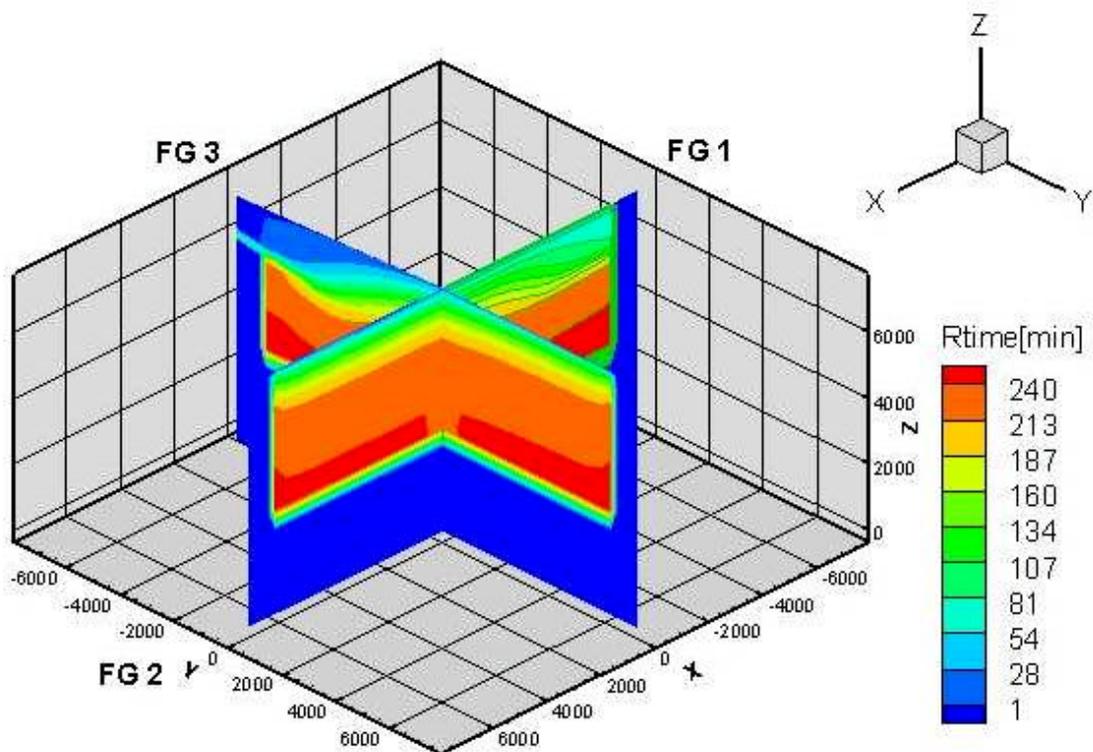
e)  $t = 150$  min



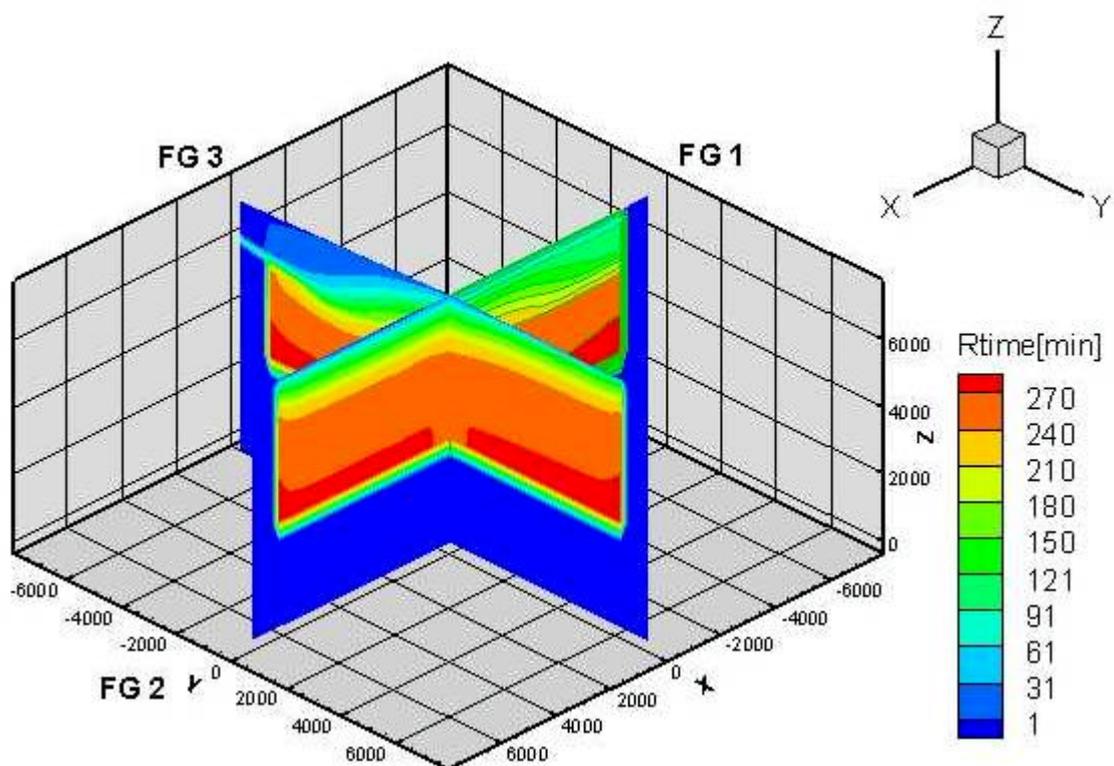
f)  $t = 180$  min



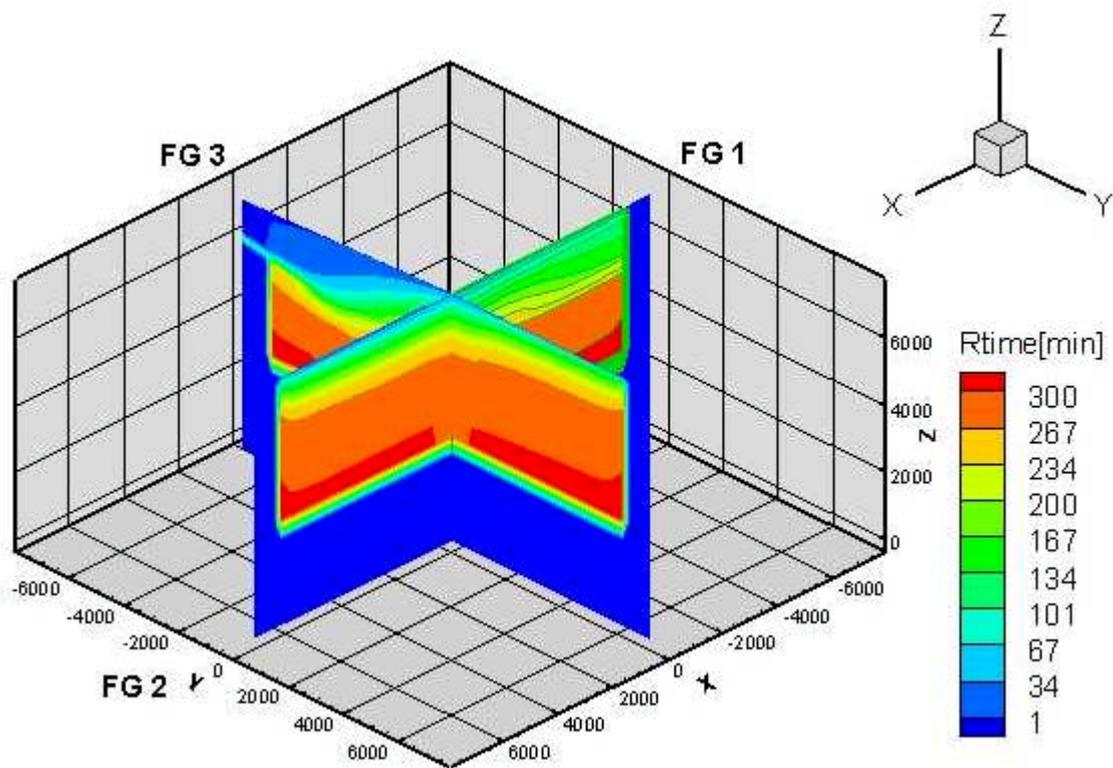
g)  $t = 210$  min



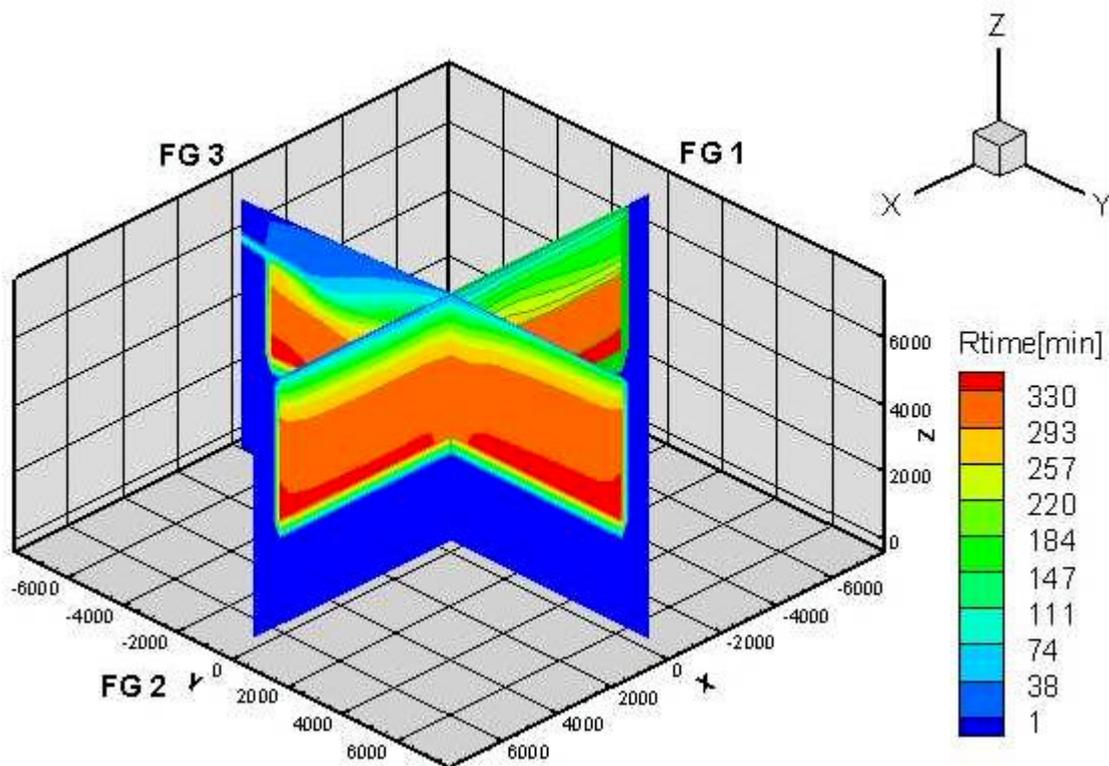
h)  $t = 240$  min



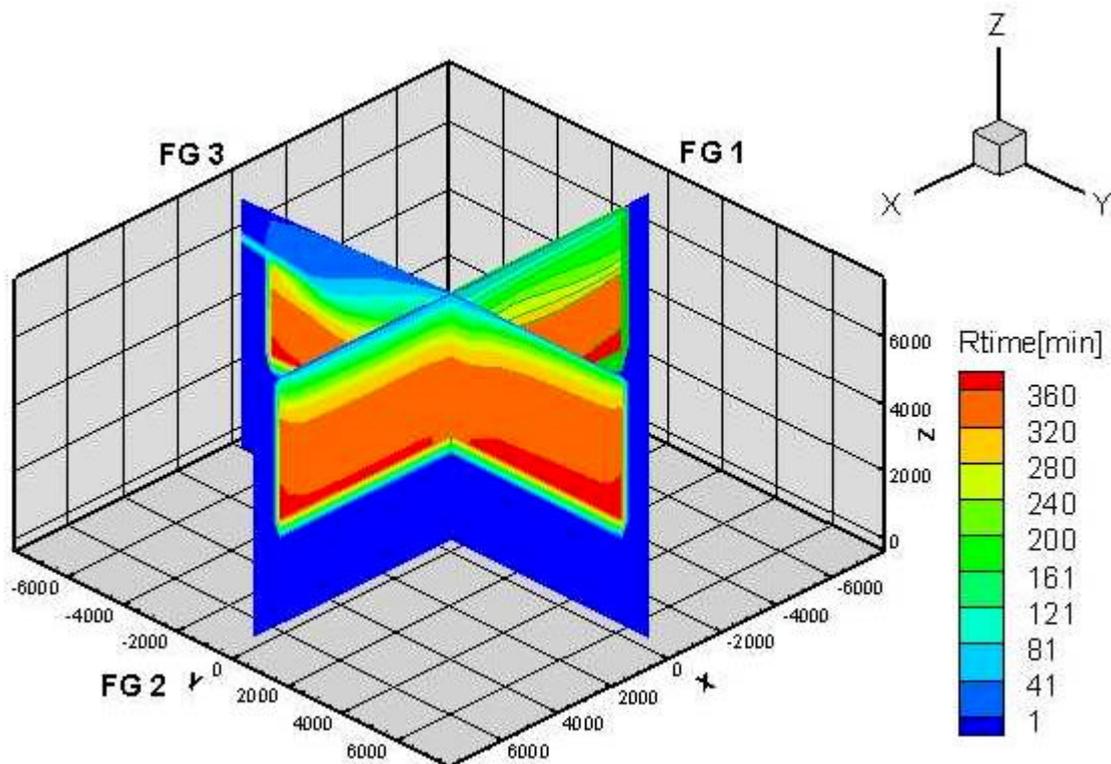
i)  $t = 270$  min



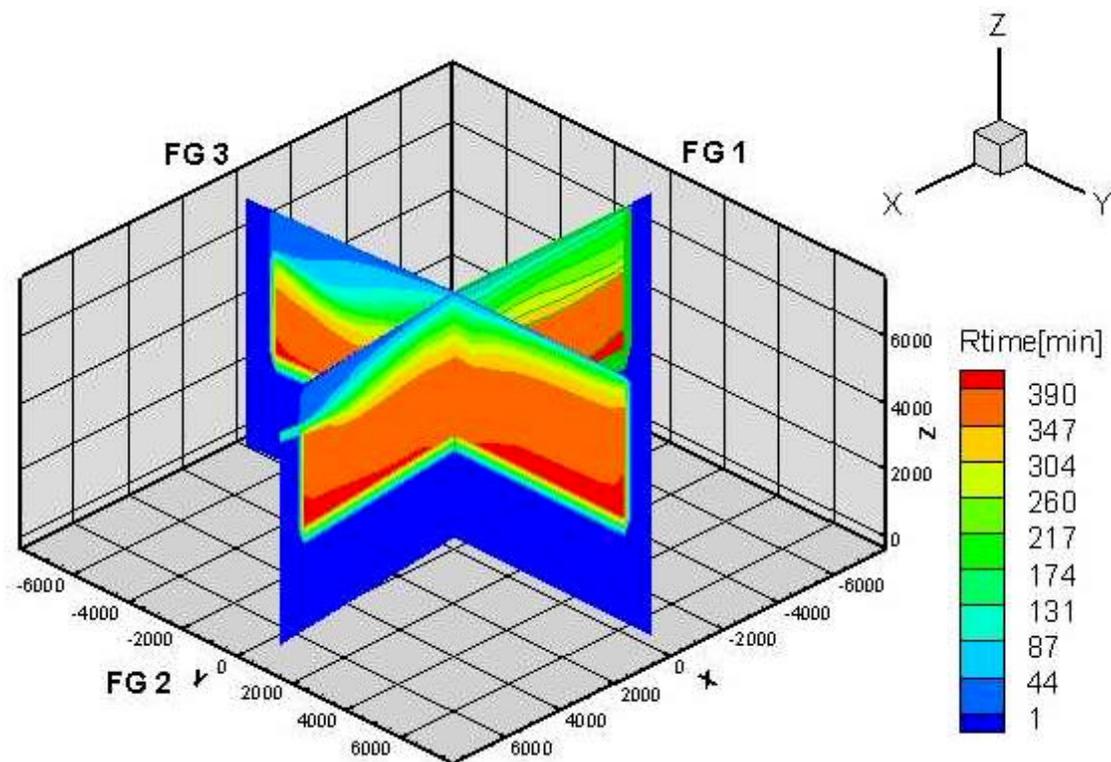
j)  $t = 300$  min



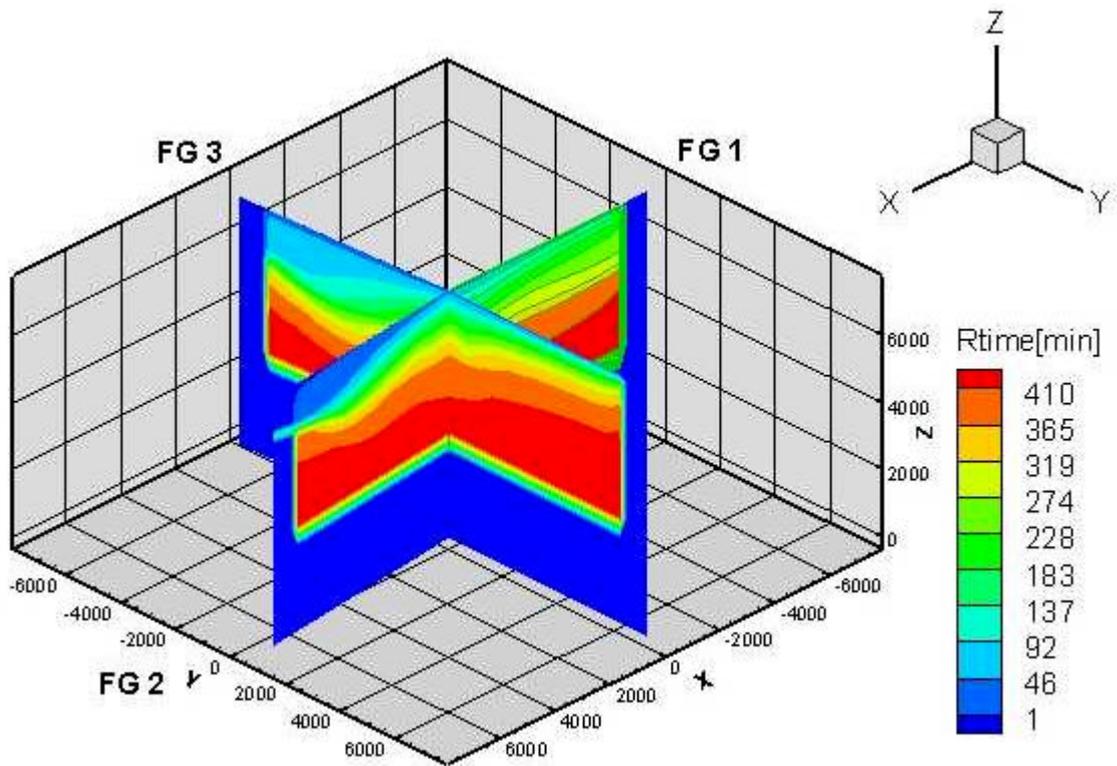
k)  $t = 330$  min



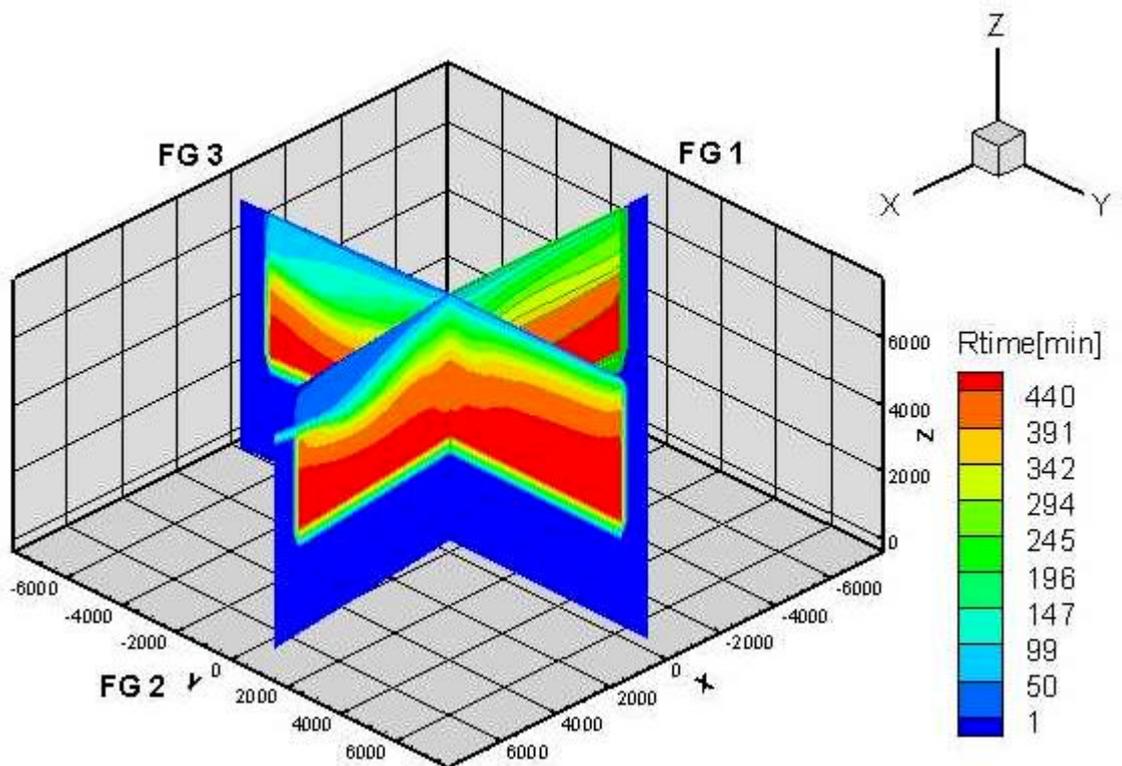
l)  $t = 360$  min



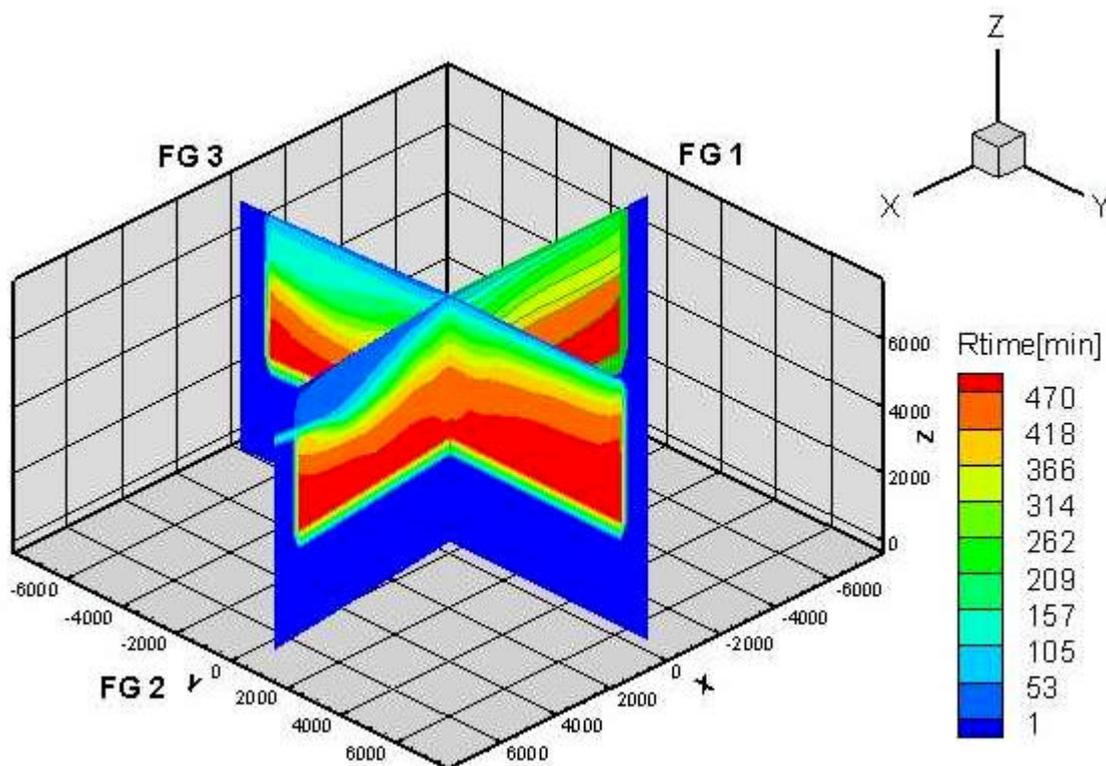
m)  $t = 390$  min



n)  $t = 410$  min



o)  $t = 440$  min

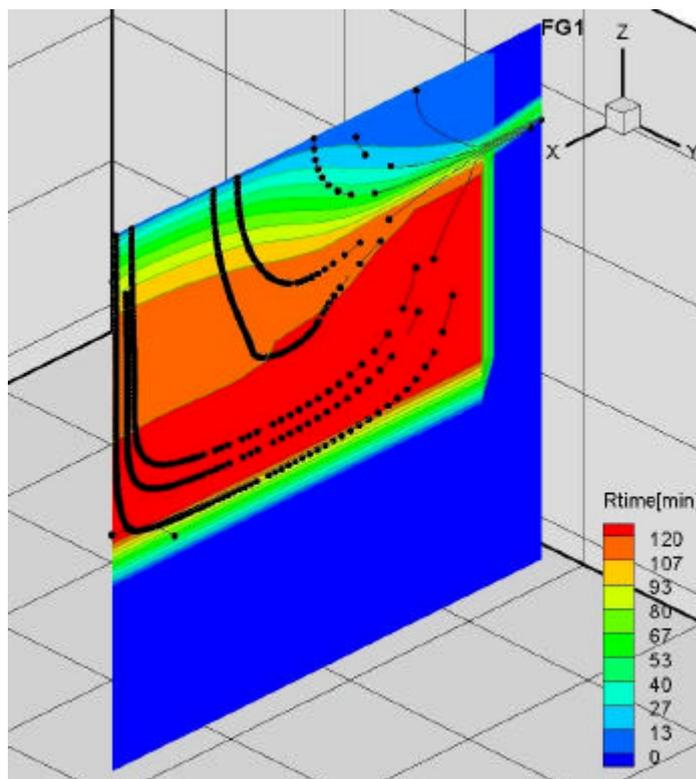


p)  $t = 470$  min

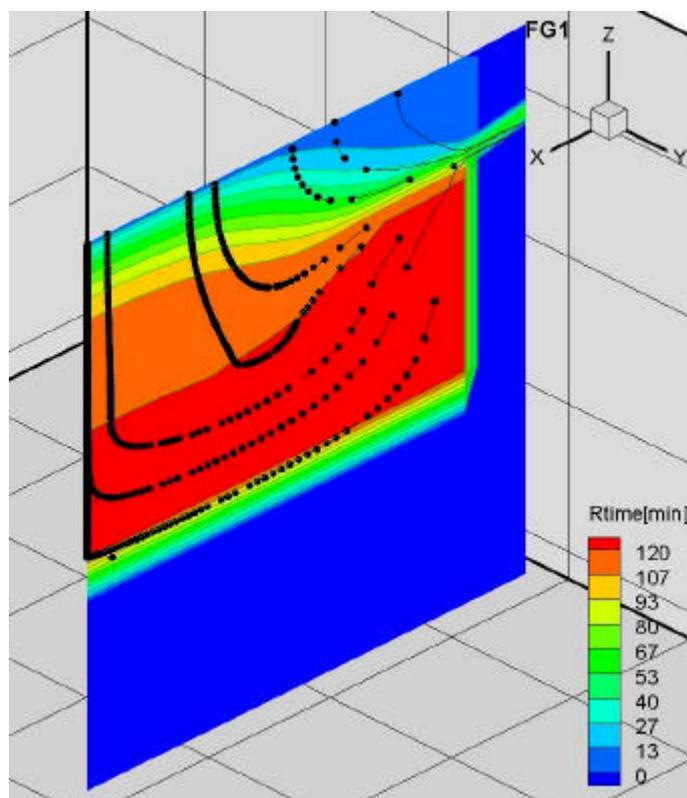
Figura 5.10 – Evolução do tempo de residência do material líquido.

Pela figura 5.10 pode-se observar o acompanhamento do tempo de residência do material líquido no cadinho, sendo que é mostrado um tempo relativo ao de vazamento, considerando uma seqüência de corrida nas três áreas do AF3. Observa-se uma tendência de acúmulo de material na região onde não se tem vazamento, no caso, no ângulo de  $0^\circ$ . Também se observa uma saída mais rápida do material que chega sobre o furo de corrida que está em vazamento, independente de qual seja esse furo.

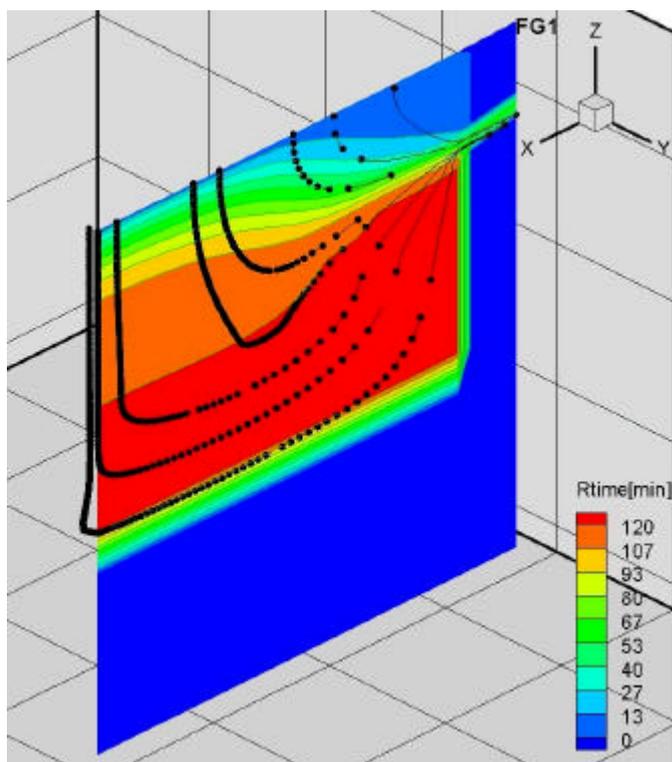
Escolhendo o tempo de 120 min e FG1, que foi um período de estabilização da velocidade, pode-se observar a variação das linhas de fluxo e do tempo de residência do material, nas condições avaliadas, (figura 5.11).



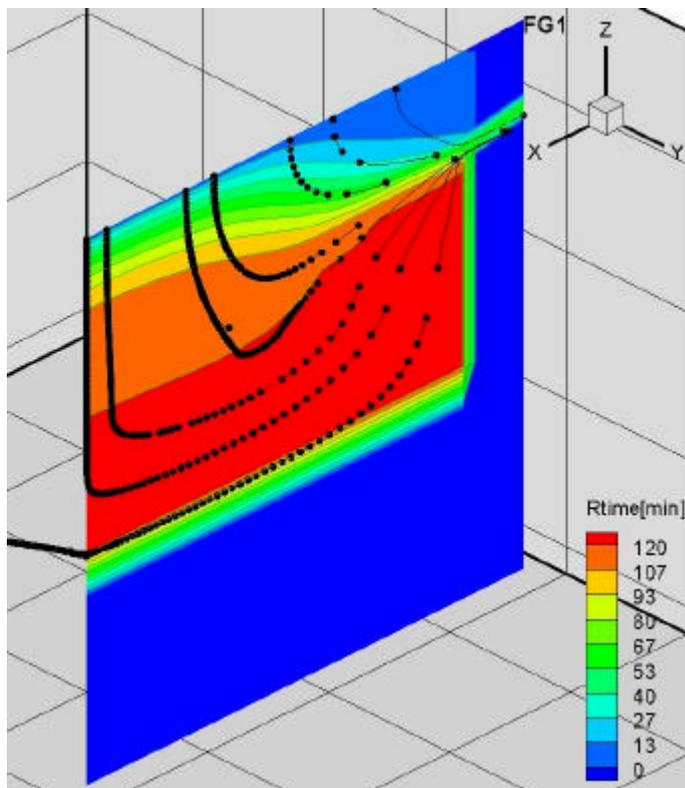
a) diâmetro do coque = 15 mm



b) diâmetro do coque (padrão) = 30 mm



c) diâmetro do coque = 45 mm

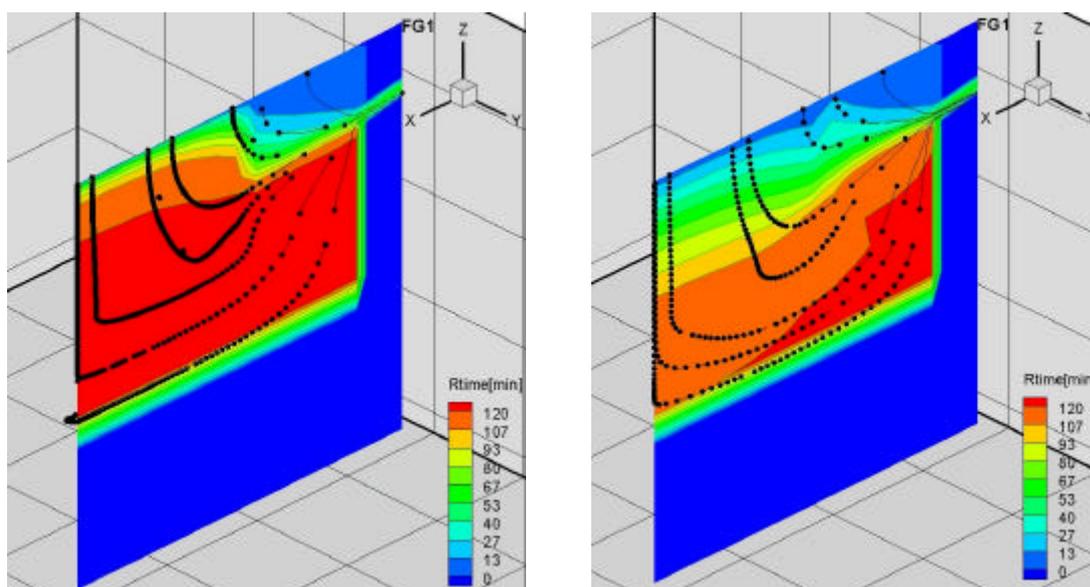


d) diâmetro do coque = 60 mm

Figura 5.11 – Linha de fluxo e tempo de residência para diferentes situações.

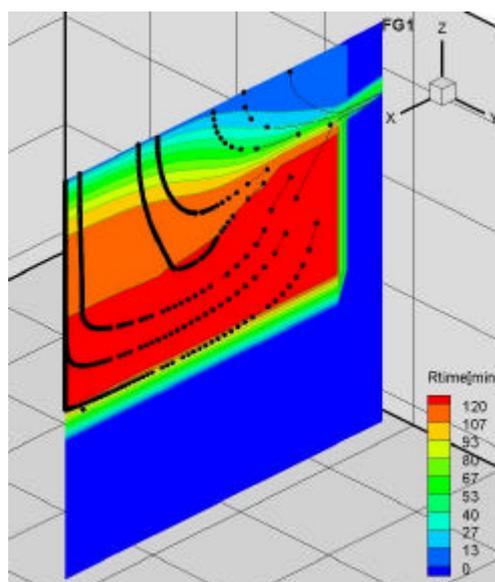
Não se observa notável influência da granulometria do coque no tempo de residência, nem nas linhas de fluxo, desde que o homem morto esteja sempre flutuando, e a distribuição do coque seja homogênea.

Já quando se considera variação da granulometria do coque ao longo do raio, fica visível a influência desse combustível nas linhas de fluxo, e por consequência no tempo de residência do líquido, (figura 5.12)



a) diâmetro do coque = 30 mm e 60 mm

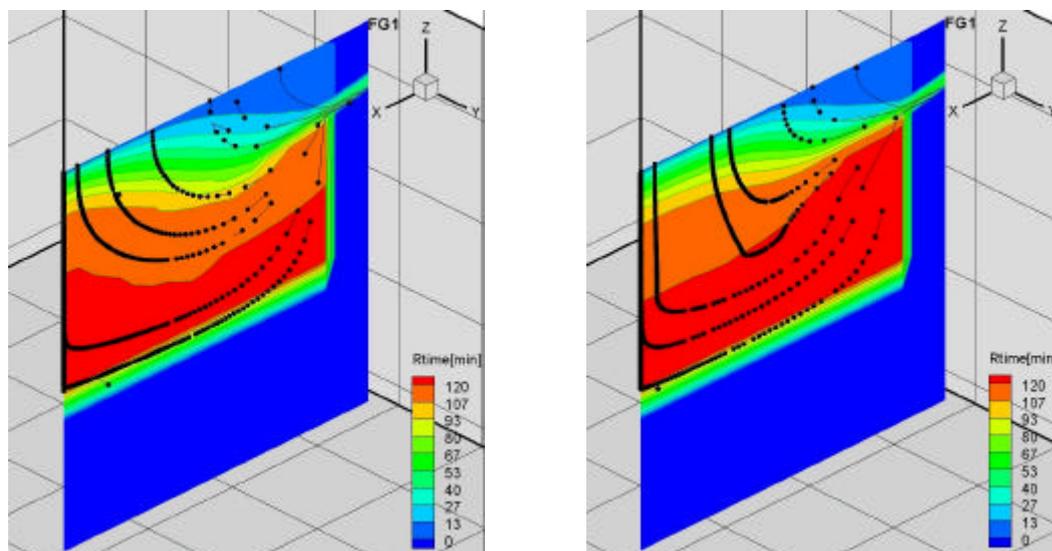
b) diâmetro do coque = 60 mm e 15 mm



c) diâmetro do coque = 30 mm (padrão)

Figura 5.12 – Linhas de fluxo, ao avaliar a distribuição do coque no cadinho.

Também em conformidade com a literatura, pode-se observar uma grande influência da situação do homem morto nos parâmetros que vêm sendo avaliados, (figura 5.13).



a) homem morto assentado

b) homem morto flutuando

Figura 5.13 – Linhas de fluxo, avaliando a alteração do homem morto.

Não se observa, no caso desse modelo, variação da temperatura do fluido em função da permeabilidade do leito de coque, nem da posição do homem morto Contudo, pode-se observar uma influência do resfriamento externo na massa líquida, próxima à parede do cadinho. Este efeito certamente determina a formação de uma zona pastosa do gusa, possibilitando proteção de desgaste ao refratário do cadinho, (figura 5.14).

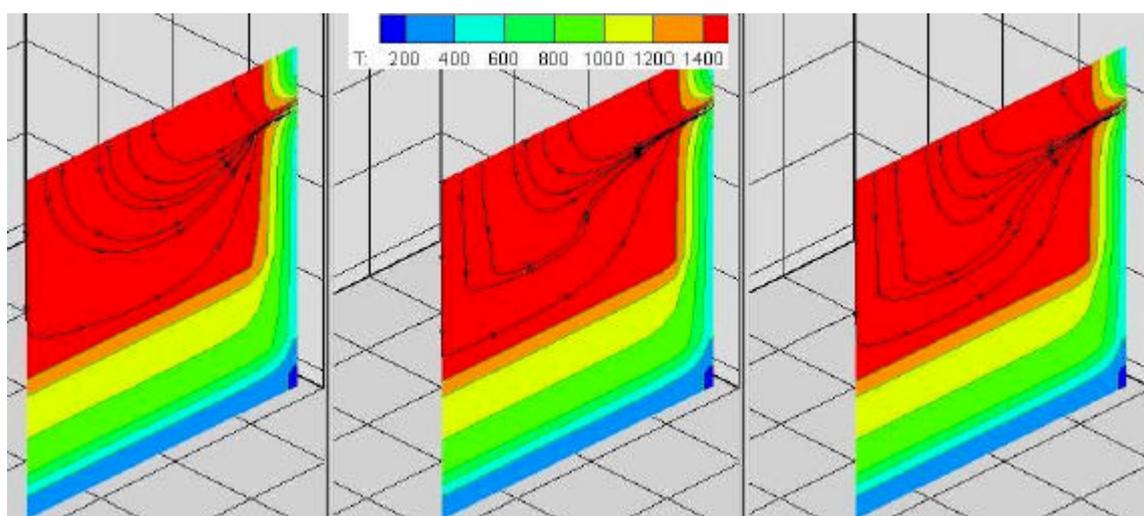


Figura 5.14 – Temperatura do líquido, respectivamente nas condições de homem morto assentado, coque com diâmetro variando ao longo do raio e homem morto flutuando.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre a movimentação do líquido no interior do cadinho do Alto-Forno 3 da Usiminas. Este estudo englobou o desenvolvimento de um balanço de forças que permite avaliar a flutuação do homem morto no cadinho, baseado nas características do alto-forno e em suas condições operacionais. O resultado é então utilizado para alimentar o modelo matemático previamente desenvolvido por Castro *et al.*<sup>(52)</sup>. Além disso, foi realizada a implementação, neste modelo, de uma nova rotina para cálculo da velocidade de saída do material, considerando a variação da altura de líquidos e do diâmetro do furo de gusa com o tempo, e uma rotina que permite alterar a distribuição da granulometria do combustível ao longo do raio do cadinho. Nesta etapa, o modelo se mostrou consistente para utilização no AF3 da Usiminas, e os resultados alcançados com a sua utilização permitiram que fossem tiradas as seguintes conclusões:

- ◆ a determinação da distância entre o fundo do cadinho e o início da coluna de coque está intimamente ligada à variação de pressão de sopro e de topo e ao peso da carga no alto-forno;
- ◆ a movimentação do líquido no cadinho é muito influenciada pela situação de flutuação, ou não, do homem morto. Quando o homem morto se apresenta assentado no cadinho, o fluido tende a ir diretamente para o furo de gusa. Por outro lado, quando o homem morto está flutuando, o líquido primeiramente vai para a região sem coque e, posteriormente, segue para o furo de gusa;
- ◆ a variação homogênea da granulometria do coque não influenciou de forma significativa a distribuição dos líquidos nem o tempo de residência. No entanto, a distribuição granulométrica do coque ao longo do raio no interior do cadinho tem forte influência nas linhas de fluxo do líquido, e conseqüentemente, na sua retenção.

É importante reafirmar que modelos matemáticos estão em constante aprimoramento, e suas adequações permitem sempre um melhor acompanhamento das variáveis que governam o processo. Além disso, permite explicar vários fenômenos que ocorrem na operação rotineira do reator, dando suporte à área operacional, no sentido de possibilitar um melhor controle do processo.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o contínuo aprimoramento do modelo de fluxo de líquidos no cadinho, sugere-se o desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

- ◆ alterar a equação de velocidade de saída de gusa tão logo seja instalado um novo sistema de pesagem em carro torpedo, desenvolvido pela própria empresa;
- ◆ aprimorar o modelo de flutuação do homem morto no sentido de permitir avaliar sua variação durante o esgotamento;
- ◆ desenvolver metodologia de acompanhamento do índice de limpeza do homem morto (DCI), relacionado à composição química do gusa e escória e às suas temperaturas, devido à grande importância e influência do coque na movimentação de líquidos;
- ◆ implementar rotina que permita avaliar o escoamento de duas fases líquidas (gusa e escória);
- ◆ estudar a viabilidade de alteração do modelo, de modo a permitir uma investigação detalhada da dissolução de carbono no ferro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CASTRO, L. F. A. de. **Desenvolvimento de um Modelo de Controle de Processo para Altos-Fornos a Carvão Vegetal: CPGEM/UFMG.** 144p Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.
2. POST, J. R.; PEETERS, T.; YANG, Y.; REUTER, M. A. **Hot Metal Flow in the Blast Furnace Hearth: Thermal and Carbon Dissolution Effects on Buoyancy, Flow and Refractory Wear.** Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia. pp. 433-440 December, 2003.
3. HAVELANGE, O.; FRANSSSEN, C. **The Influence of the Coke Quality on Blast Furnace Hearth Permeability.** Meeting of Young Blast Furnace Engineers. Scunthorpe, 2002.
4. KOWALSKI, W.; BACHHOFEN, H. J.; RÜTHER, H. **Investigation on Tapping Strategies at the Blast Furnace with Special Regard to the State of the Hearth.** ICSTI/ Ironmaking Conference Proceedings, pp. 595-606, 1998.
5. FIGUEIRA, R. N.; TAVARES, R. P. **Aerodinâmica do Alto-Forno: Fenômenos Aero e Hidrodinâmicos na Zona Úmida.** Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais. Abril, 2003.
6. CASTRO, J. A. NOGAMI, H. YAGI, J. **Three-dimensional Multiphase Mathematical Modeling of the Blast Furnace Based on the Multifluid Model.** TRANSACTION ISIJ, vol. 42 n° 1 pp. 44-52, 2002.
7. SCUDELLER, L. A. M. **Avaliação da Massa de Tamponamento através da sua Caracterização e da Monitoração e Simulação Operacional do Furo de Corrida de Alto-Forno.** São Carlos: DEMa/UFSCar, 1997.234p Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, 1997.
8. PETERS, M.; RÜTHER, P.; SCHMÖLE, P. **Determination of the Liquid Level in the Hearth of the Blast Furnace.** Ironmaking Conference Proceedings. pp. 283-295, 2001.
9. CHATTERJEE, A. ROY, A. K. PRASAD, A. S. SHUKLA, K. P. SAHA, J. K. KUMAR, T. S. P. **Hearth Conditions in a Blast Furnace with Particular Reference to Hot Metal Drainage.** Tata Steel, India, pp. 54-61, 1994.
10. FUKUTAKE, T.; OKABE, K. **The Hearth Drainage of the Blast Furnace.** In: International Blast Furnace Hearth and Raceway Symposium, Newcatle, pp. 2.1-11, 1981.
11. SAXÉN, H.; BRÄNNBACKA, J. **Modelling the Liquid Levels in the Blast Furnace Hearth.** TRANSACTION ISIJ, vol. 41, n°10, pp. 1131-1138, 2001.
12. SUH, Y. K. *et al.*, **A Study on the Flow of Molten Iron in the Hearth of Blast Furnace.** In: Ironmaking Conference, 55, Pittsburgh, pp. 35-38, 1997.
13. TANZIL, W. B. V. F.; NIGHTINGALE, R. J.; ZULLI, P.; WRIGHT, B. D.; BEAN, I. **Improved Blast Furnace Casting Performance Through Implementation of**

- Hearth Drainage Mathematical and Physical Models.** SCANMET II, 2nd International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking, Lulea, Sweden, vol. 1pp. 321-332. June 2004.
14. TORRKULLA, J.; SAXÉN, H. **Model of the State of the Blast Furnace Hearth.** TRANSACTION ISIJ, vol. 40 pp. 438-447, 2000.
  15. BRÄNNBACKA, J.; TORRKULLA, J.; SAXÉN, H. **Modelling the Drainage of the Blast Furnace Hearth.** Ironmaking Conference Proceedings. pp. 313-322, 2001.
  16. BRÄNNBACKA, J.; SAXÉN, H. **Simulation of the Liquid Levels in the Blast Furnace Hearth.** SCANMET II, 2nd International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking, Sweden. pp. 103-112, June 2004.
  17. NISHIOKA, K.; SHIMIZU, M.; MAEDA, T. **Influence of Various in-furnace Conditions on Drainage Rate and Residual amount of Slag and Metal in Blast Furnace Hearth.** SCANMET II, 2nd International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking, Lulea, Sweden, vol. 1, pp. 113-122, June 2004.
  18. CHEW, S. J.; ZULLI, P.; YU, A. **Modelling of Liquid Flow in the Blast Furnace. Theoretical Analysis of the Effects of Gas, Liquid and Packing Properties.** TRANSACTION ISIJ, vol. 41, n° 10, pp. 1112-1121, 2001.
  19. CHEW, S. J.; ZULLI, P.; AUSTIN, P. R.; MATHIESON, J. G.; YU, A. **Assessment of the Blast Furnace Lower Zone Permeability Based on Liquids Flow Distribution.** Ironmaking Conference Proceedings. pp. 241-252, 2001.
  20. NOGAMI, H.; TODA, K.; PINTOWANTORO, S.; YAGI, J. **Cold-model Experiments on Deadman Renewal Rate Due to Sink-Float Motion of Hearth Coke Bed.** ISIJ International, vol. 44, n° 12, pp. 2127-2133, 2004.
  21. NOGAMI, H.; YAMAOKA, H.; TAKATANI, K. **Raceway Design for the Innovative Blast Furnace.** ISIJ International, vol. 44, n° 12, pp. 2150-2158, 2004.
  22. PANJKOVIC, V.; TRUELOVE, J. S.; ZULLI, **Numerical Modelling of Iron Flow and Heat Transfer in Blast Furnace Hearth.** Ironmaking and Steelmaking, vol. 29 pp. 390-400, 2002.
  23. TAKATANI, K.; INADA, T.; TAKATA, K. **Mathematical Model for Transient Erosion Process of Blast Furnace Hearth.** TRANSACTION ISIJ, vol. 41 n°10, pp. 1139-1145, 2001.
  24. HAVELANGE, O.; DANLOY, G.; FRANSSSEN, C. **The Dead Man, Floating or Not?** La Revue de Metallurgie-CIT, pp. 195-201 March, 2004.
  25. DESAI, B.; RAMNA, R. V.; DEY, A. **Assessment of the Blast Furnace Lower Zone Permeability based on Casting Parameters.** Proceeding of the 5th European Coke and Ironmaking Congress (ECIC). Estocolmo, Suécia. pp. Tu1:6 – 1 ~ 13, June 2005.
  26. WRIGHT, B.; ZULLI, P.; BIERBRAUER, F.; PANJKOVIC, V. **Assessment of Refractory Condition in a Blast Furnace Hearth using Computational Fluid Dynamics.** Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia. pp. 645-650 December, 2003.

27. ELSAADAWY, E. A.; LU, W-K. **Mathematical Modeling of Flows in the Coke-Free Layer of a Blast Furnace Hearth.** Iron & Steel Technology Conference Proceedings. Vol. I. Charlotte, North Carolina, USA. May 9-12, 2005.
28. TANZIL, W. B. V. F.; ZULLI, P.; BURGESS, J. M.; PINCZEWSKI, W. V. **Experimental Model Study of the Physical Mechanisms Governing Blast Furnace Hearth Drainage.** TRANSACTION ISIJ, vol. 24 n°03, pp. 197-205, Mar. 1984.
29. CHEN, A.; ELSAADAWY, E.; LU, W. K. **Physical Modelling of Flows in the Blast Furnace Hearth.** Iron & Steel Technology Conference Proceedings. Vol. I. Charlotte, North Carolina, USA. May 9-12, 2005.
30. NOUCHI, T.; YASUI, M.; TAKEDA, K. **Effects of Particle Free Space on Hearth Drainage Efficiency.** TRANSACTION ISIJ, vol. 43 pp. 175-180, 2003.
31. TORRKULLA, J. BRÄNNBACKA, J. SAXÉN, H. WALLER, M. **Indicators of the Internal State of the Blast Furnace Hearth.** TRANSACTION ISIJ, vol. 42 n°5, pp. 504-511, 2002.
32. NAKAMOTO, M.; TANAKA, T.; LEE, J.; USUI, T. **Evaluation of Viscosity of Molten SiO<sub>2</sub>-CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Slags in Blast Furnace Operation.** ISIJ International, vol. 44, n° 12, pp. 2115-2119, 2004.
33. CHEW, S. J.; ZULLI, P.; YU, A. **Modelling of Liquid Flow in the Blast Furnace. Application in a comprehensive Blast Furnace Model.** TRANSACTION ISIJ, vol. 41, n° 10, pp. 1122-1130, 2001.
34. DUARTE, A. K.; FERNANDES, J. E. **Projeto Refratário para Altos-Fornos a Carvão Vegetal e a Coque.** Curso de Fabricação de Ferro-Gusa em Alto-Forno, ABM. Belo Horizonte, MG. Maio, 2006.
35. BRÄNNBACKA, J.; SAXÉN, H. **Modelling the Liquid Levels in the Blast Furnace Hearth.** TRANSACTION ISIJ, vol. 41 n° 10 pp. 1131-1138, 2001.
36. BRÄNNBACKA, J.; SAXÉN, H. **Model Analysis of the Operation of the Blast Furnace Hearth with a Sitting and Floating Dead Man.** TRANSACTION ISIJ, vol. 43 n° 10 pp. 1519-1527, 2003.
37. DESAI, B.; AJMANI, S.; K.; RAMNA, R. V.; NARSIMHA, M. **Quantification of Liquid Metal Flow in Blast Furnace Hearth.** Proceeding of the 5th European Coke and Ironmaking Congress (ECIC). Estocolmo, Suécia. pp. We4:5-1~19, June 2005.
38. PANJKOVIC, V.; TRUELOVE, J. **Computational Fluid Dynamics Modelling of Iron Flow and Heat Transfer in Blast Furnace Hearth.** Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, pp. 399-4404. Melbourne, Australia. 6-8 December, 1999.
39. NEGRO, P.; PETIT, C.; URVOY, A.; SERT, D.; PIERRET, H. **Characterization of the Permeability of the Blast Furnace Lower Part.** Ironmaking Conference Proceedings. pp. 337-348, 2001.
40. OMORI, Y. **Blast Furnace Phenomena and Modelling,** Elsevier Applied Science. London, 1987.

41. LEE, J.; CHUNG, J. **Effect of Packed Bed State on the Liquid Flow in Blast Furnace Hearth.** SCANMET II, 2nd International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking, Lulea, Sweden, vol. 1, pp. 123-131, June 2004.
42. NISHIOKA, K.; MAEDA, T.; SHIMIZU, M. **A Three-dimensional Mathematical Modelling of Drainage Behavior in Blast Furnace Hearth.** ISIJ International, vol. 45, n° 5, pp. 669-676, 2005.
43. NISHIOKA, K.; MAEDA, T.; SHIMIZU, M. **Effect of Various In-furnace Conditions on Blast Furnace Hearth Drainage.** ISIJ International, vol. 45, n° 10, pp. 1496-1505, 2005.
44. NOUCHI, T.; SATO, M.; TAKEDA, K.; ARIYAMA, T. **Effects of Operational Condition and Casting Strategy on Drainage Efficiency of the Blast Furnace Hearth.** ISIJ International, vol. 45, n° 10, pp. 1515-1520, 2005.
45. DANLOY, G. BAUDUIN, J. **Measurement of Iron and Slag Level in the Blast Furnace Hearth.** 58th Iron Making Conference Proceedings, Chicago, pp.89-98, 1999.
46. HUANG, D. F.; CHAUBAL, P.; YAN, F.; ZHOU, C. Q. **The use of a CFD Model for Understanding the Internal Conditions in a Blast Furnace hearth.** Proceeding of the 5th European Coke and Ironmaking Congress (ECIC). Estocolmo, Suécia. pp. We1:1-1~15, June 2005.
47. INABA, S.; KIMURA, Y.; SHIBATA, H.; OHTA, H. **Measurement of Physical Properties of Slag Formed around the Raceway in the Working Blast Furnace.** ISIJ International, vol. 44, n° 12, pp. 2120-2126, 2004.
48. HUSSLAG, W. M.; STEEGHS, A. G. S.; BAKKER, T.; HEEREMA, R. H.; REUTER, M. A. **Flow Experiments of Slag and Metal at 1400-1600 °C through a Packed Coke Bed.** Ironmaking Conference Proceedings. pp. 323-335, 2001.
49. ZHOU, C. Q.; YAN, F.; ROLDAN, D. **Evaluation of Internal Conditions in a Blast Furnace Hearth Using a 3-D CFD Model.** Iron & Steel Technology Conference Proceedings. Vol. I. Charlotte, North Carolina, USA. May 9-12, 2005.
50. PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow.** Editora Taylor & Francis, 1980.
51. CASTRO, J. A. **Modelamento Matemático Bidimensional do Alto-Forno para Análise do Processo.** UFF, 1996.123p Dissertação (Mestrado em Metalurgia) – Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, 1996.
52. CASTRO, J. A.; NOGAMI, H.; YAGI, J. **Modelling of Liquids Dynamics Inside the Blast Furnace Hearth.** Spring ISIJ working group Meeting on lower part of blast furnace modeling; Kanazawa, Japan. pp 72-74; July, 2000.
53. GANDRA, B. F.; SCUDELLER, L. A. M.; CASTRO, J. A.; CASTRO, L. F. A. **Fluxo de Líquidos no Cadinho do Alto-Forno.** XXXV Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, ABM. Florianópolis, SC, 2005.