

VINICIUS MARTINS VILELA

DRENAGEM DO CADINHO DO ALTO FORNO

ESP/SO
2008
V71d

**São Paulo
2008**

VINICIUS MARTINS VILELA

DRENAGEM DO CADINHO DO ALTO FORNO

**Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como trabalho de conclusão do curso de
MBA em Siderurgia**

Orientador:

Prof. Dr. José Trani Deodoro Capocchi

**São Paulo
2008**

AGRADECIMENTOS

À Companhia Siderúrgica Paulista pela oportunidade de realizar o curso.

Ao Professor Dr. José Deodoro Trani Capocchi pela orientação no trabalho de monografia.

À Vanessa Straiollo do Centro de Informações Técnicas da COSIPA pela atenção e cooperação na pesquisa bibliográfica.

RESUMO

O trabalho apresenta pesquisa sobre estudos da drenagem de líquidos no cadinho de alto forno, mostra resultados da estimativa do nível de escória na operação do alto forno 2 da COSIPA e as possíveis relações com variáveis que podem influenciá-lo. Foram usados dados de corridas do ano de 2005 que não evidenciaram influência de fatores como qualidade do coque, comprimento de furo, nível de produção e fluxo térmico no fundo do cadinho, sobre o nível de escória estimado.

Palavras-chave: alto forno, cadinho, drenagem, nível de escória.

ABSTRACT

This work presents a literature review about blast furnace hearth drainage and shows a report on the estimation of hearth slag level of the Number 2 Blast Furnace of COSIPA. The expected relationship between slag level and the variables that may influence its results were studied. In this report it was used the 2005 year's Cast House and Operation Data of Number 2 Blast Furnace which didn't show any relation between variables such as coke quality, tap hole lenght, production level and others in the behavior of the slag level at that year.

Key words: blast furnace, hearth, drainage, slag level.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	12
1 OBJETIVO	15
2 JUSTIFICATIVA	16
3 REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1 CARACTERÍSTICAS E FUNCIONAMENTO DO ALTO FORNO.....	17
3.2 O PROCESSO DO ALTO FORNO.....	18
3.3 ESCOAMENTO DO FERRO E ESCÓRIA LÍQUIDOS.....	21
3.4 MODELOS FÍSICOS DE DRENAGEM DO CADINHO.....	23
3.5 MODELAMENTO MATEMÁTICO DA DRENAGEM DO CADINHO.....	32
3.6 FATORES OPERACIONAIS QUE INFLUENCIAM A DRENAGEM DO CADINHO....	39
3.6.1 PERMEABILIDADE DO LEITO DO CADINHO.....	39
3.6.2 RITMO DE PRODUÇÃO.....	49
3.6.3 VISCOSIDADE DA ESCÓRIA.....	52
3.6.4 COMPRIMENTO DE FURO.....	56
3.6.5 LOCALIZAÇÃO DO FURO DE GUSA NO CADINHO.....	58
3.6.6 DIÂMETRO DO FURO DE CORRIDA	58
4 ESTIMATIVA DO NÍVEL DE ESCÓRIA DO ALTO FORNO 2 DA COSIPA E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS OPERACIONAIS	61
4.1 DADOS GERAIS DO ALTO FORNO 2 DA COSIPA.....	62
4.2 DADOS UTILIZADOS NO ESTUDO E EVOLUÇÃO DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS DO ALTO FORNO 2.....	63
4.3 ESTIMATIVA DO NÍVEL DE ESCÓRIA MÁXIMO.....	67
4.4 ESTIMATIVA DO NÍVEL DE ESCÓRIA PELAS EQUAÇÕES DA FLUIDODINÂMICA.....	70
4.5 ANÁLISE POR REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA.....	77

4.6 AVALIAÇÃO DOS DADOS DO PERÍODO DE 2002 A 2007 DA ATUAL CAMPANHA DO ALTO FORNO 2	78
5 CONCLUSÕES.....	81
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração das regiões do alto forno.....	17
Figura 2 . Ilustração do alto forno e suas zonas.	21
Figura 3 – Fluxo viscoso análogo para fluxo em leito de partículas e fluxo entre duas placas paralelas.....	24
Figura 4 - Ilustração esquemática do modelo físico do cadinho.....	27
Figura 5 - Diagrama esquemático do balanço de forças na superfície da escória	27
Figura 6 - Evolução com o tempo da velocidade do líquido, proporção de HCFC e nível de líquidos	29
Figura 7 - Medida de velocidade de drenagem e proporção de gusa em alto forno Real.....	30
Figura 8 - Modelo físico tri-dimensional do cadinho	31
Figura 9 - Ilustração do fluxo no modelo físico tri-dimensional do cadinho simulando condições do homem morto para leito homogêneo de partículas.....	32
Figura 10. Relação entre a proporção de escória residual e coeficiente de drenagem F_L	40
Figura 11 - Zona de baixa permeabilidade no modelo do cadinho	41
Figura 12 - Efeito da zona de baixa permeabilidade (ZBP) no nível de líquidos.....	42
Figura 13 - Efeito do diâmetro do coque e fração de vazios no máximo nível de escória	42
Figura.14 - Ilustração do fluxo no modelo físico tri-dimensional do cadinho com leito heterogêneo de partículas e variações da camada livre de coque.....	43
Figura 15 – Efeito do diâmetro do leito de partículas (coque) no nível médio da camada de gusa e escória	47
Figura 16 – Efeito da permeabilidade do leito de partículas (coque) no nível médio da camada de gusa e escória.....	48
Figura 17 - Efeito do aumento da produção na proporção de HCFC e nível de líquido no cadinho, com o tempo.....	50
Figura 18 - Efeito da produção no máximo nível de escória	52
Figura .19 Efeito da viscosidade da escória e taxa de vazamento na quantidade de escória residual	53
Figura 20 - Efeito da viscosidade e produção no máximo nível de escória	54

Figura 21 - Influência da viscosidade da escória na espessura da camada de líquidos no cadinho	55
Figura 22 - Ilustração do efeito do comprimento de furo no modelo físico... ..	56
Figura 23 - Efeito da abertura inicial sobre o nível de líquidos.....	59
Figura 24 - Efeito da velocidade inicial de drenagem na proporção de HCFC e nível de líquidos segundo Nouchi et al.....	59
Figura 25 - Efeito da velocidade inicial de drenagem (diâmetro inicial do furo) no tempo de corrida	60
Figura 26 - Efeito da velocidade inicial de drenagem (diâmetro inicial do furo) e taxa de aceleração da drenagem no nível de escória.....	60
Figura 27 - Ilustração da planta do cadinho com as três casas de corrida do Alto forno 2 da COSIPA.	63
Figura 28 - Evolução da produção de gusa do alto forno 2 da COSIPA em 2005....	65
Figura 29 - Evolução do fluxo térmico no fundo do cadinho do alto forno 2 da COSIPA em 2005.....	65
Figura 30 - Evolução do comprimento de furo de gusa do alto forno 2 da COSIPA em 2005.....	66
Figura 31 - Evolução do tempo de corrida do alto forno 2 da COSIPA em 2005.....	66
Figura 32 - Evolução do tempo de corrida do alto forno 2 da COSIPA em 2005.....	67
Figura 33 - Evolução do nível de escória máximo no alto forno 2 da COSIPA em 2005.....	68
Figura 34 - Nível de escória máximo e fluxo térmico - alto forno 2 da COSIPA em 2005.....	69
Figura 35 - Nível de escória máximo e tamanho médio do coque no alto forno 2 da COSIPA em 2005.....	69
Figura 36 - Relação entre o nível de escória máximo e vazão de ar soprado e oxigênio (ritmo de produção) no alto forno 2 da COSIPA em 2005.....	69
Figura 37 - Gráfico relacionando nível de escória e viscosidade da escória no ano de 2005.....	72
Figura 38 - Gráfico relacionando nível de escória X fluxo térmico no fundo do cadinho no ano de 2005.....	73
Figura 39 - Gráfico relacionando nível de escória e comprimento de furo no ano de 2005.....	73

Figura 40 - Gráfico relacionando nível de escória e vazão de ar + oxigênio no ano de 2005.....	74
Figura 41 - Gráfico relacionando nível de escória e reatividade do coque.....	75
Figura 42 - Gráfico relacionando nível de escória e CSR do coque.....	76
Figura 43 - Gráfico relacionando nível de escória e DI do coque.....	76
Figura 44 - Gráfico relacionando nível de escória e fluxo térmico no fundo do cadinho.....	78
Figura 45 - Gráfico relacionando comprimento de furo e fluxo térmico no fundo do cadinho.	78
Figura 46 - Gráfico relacionando nível de escória e fluxo térmico no fundo do cadinho.	79
Figura 47 - Gráfico relacionando o intervalo de escória e fluxo térmico no fundo do cadinho.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições do modelo experimental de Nouchi et al ⁽⁴⁰⁾	29
Tabela 2 - Características gerais do alto forno 2 da COSIPA.....	62
Tabela 3 - Dados de corridas do alto forno 2 em 2005.....	63
Tabela 4 - Dados de escória das corridas do alto forno 2 em 2005.....	64
Tabela 5 - Dados operacionais do alto forno 2 relativos às corridas de 2005.....	64
Tabela 6 - Resultado do nível máximo de escória para algumas das corridas.....	68
Tabela 7 - Resultados de cálculo da altura média da camada de escória	72
Tabela 8 - Filtro para corridas do ano de 2005 visando eliminar a influência do intervalo de corrida e ritmo de produção no nível de escória no cadinho cadinho.....	76
Tabela 9 - Resultados da análise de regressão linear múltipla para nível de escória máximo.....	77
Tabela 10 - Resultados da análise de regressão linear múltipla para nível de escória médio.....	77

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a_{corrida}	- coeficiente de aumento da velocidade volumétrica total de drenagem
CFD	- Computer Fluid Dynamics (software para modelamento matemático em fluido dinâmica)
CRI	- Coke Reaction Index (Ensaio de reatividade de coque).
CSR	- Coke Strength after Reacton (Ensaio de resistência após reação a quente do coque)
COSIPA	- COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA
d_p	- diâmetro de partículas
d'_p	- diâmetro da partícula no modelo de escala reduzida.
DH	- diâmetro do cadinho em escala experimental
D	- diâmetro
d	- diâmetro médio do furo de corrida
DI	- Drum Index (índice do ensaio de resistência mecânica do coque)
e	- rugosidade superficial
f	- fator de atrito
F_R	- resistência ao fluxo
F_L	- fração de escória retida
g	- aceleração da gravidade
H	- altura da camada inicial de escória acima do base do leito.
HCFC	- hidroclorofluorcarbono
H	- nível de líquido a partir do nível da saída do furo de gusa.
k_f	- coeficiente arbitrário não-dimensional
k_h	- k_h é um coeficiente arbitrário adimensional
L	- comprimento do furo
l	- comprimento de furo de corrida
l^*	- comprimento de furo em escala reduzida
m	- mistura de gusa e escória líquidos
P	- pressão (Pa)
p	- parafina
R _{lp}	- seção transversal da ZBP
Re	- número de Reynolds
R	- coeficiente de correlação

S	- seção transversal do cadinho
t^*	- tempo
TSI	- Time Slag Index (Índice de escória da corrida).
U	- velocidade do fluido (m/s)
u	- taxa total de drenagem de gusa e escória
V	- velocidade do líquido (m/s)
v^*	- velocidade superficial,
v_{vol}^*	- velocidade volumétrica
v	- velocidade superficial no alto forno.
v'	- velocidade superficial no modelo de escala reduzida.
V_0 :	- velocidade superficial do líquido através da seção transversal do leito
v_p	- velocidade volumétrica de drenagem da parafina
v_f	- velocidade volumétrica de drenagem de HCFC
VOF	- volume of fluid method (método do volume de fluido)
VOF ₁	- célula de volume no método VOF
v_{p0}	- velocidade volumétrica de suprimento ("produção") da parafina
v_{f0}	- velocidade volumétrica de suprimento ("produção") de HCFC
v_{total0}	- velocidade volumétrica de drenagem inicial total
v	- velocidade média de vazamento
$Z_{p_{min}}$	- altura mínima da camada de parafina
$Z_{p_{max}}$	- altura máxima da camada de parafina
Z_p	- altura da camada de parafina no centro do recipiente
$Z_{corrida}$	- altura da camada de parafina no parede do recipiente
ZBP	- zona de baixa permeabilidade
z	- altura da camada de líquido
ε	- fração de vazios do leito ("coque"),
ε'	- fração de vazios de modelo de escala reduzida.
θ	- ângulo de inclinação da interface escória-gás (°)
λ	- fator de atrito do furo de corrida.
$\mu_{escória}$	- viscosidade da escória(Pa.s)
ρ :	- densidade do líquido
ρ_m :	- densidade da mistura de líquidos
ρ'	- densidade do líquido no modelo de escala reduzida.
φ	- esfericidade das partículas

$\frac{\partial(\quad)}{\partial x}$ - taxa de variação no eixo x

Δ - variação

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$$

1 OBJETIVO

Estudar, através de revisão da literatura, a drenagem de líquidos no cadinho e fazer uma estimativa do nível de escória do Alto Forno 2 da COSIPA com análise da influência de variáveis operacionais.

2 JUSTIFICATIVA

O nível de líquidos no cadinho do alto forno, especialmente a escória, tem forte influência nas condições de operação do equipamento quanto à segurança operacional, ritmo de produção e custo do ferro gusa produzido.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Características internas do alto forno

Apesar de sua utilização por centenas de anos, o conhecimento das condições internas do alto forno, em função de suas dimensões e complexidade, só foi conseguido a partir da década de 1970 com experiências de dissecação conduzidas inicialmente pelos russos e posteriormente pelos japoneses ⁽¹⁾. Os fornos em final de campanha foram resfriados e depois sua carga foi retirada e analisada, com dissecação de cima para baixo em seções espaçadas de 1,0 m a 1,5 m. Os estudos levaram à caracterização interna do alto forno em cinco zonas, conforme ilustrado na figura 1:

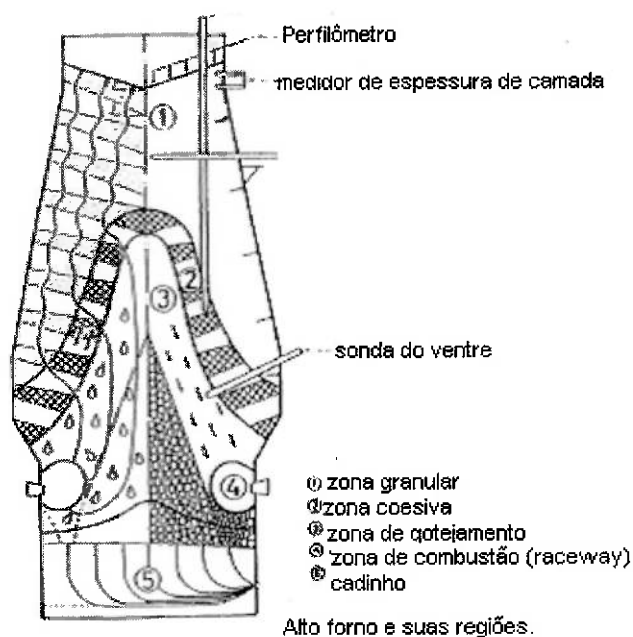


Figura 1. Ilustração das regiões do alto forno, segundo Tavares et al. ⁽¹⁾.

- Zona granular: região com presença de fase sólida e gasosa onde a carga metálica (sinter, minério ou pelota) desce sob a forma de grãos sólidos em camadas alternadas de combustível (coque ou carvão vegetal) e carga metálica.
- Zona de amolecimento e fusão: também denominada de zona coesiva, é a região onde ocorre o amolecimento e fusão da carga metálica em vários graus de redução.
- Zona de coque ativo : setor do forno constituído de camadas de combustível/redutor, pelo qual escoam o metal e escória líquidos em contracorrente com os gases ascendentes gerados na região das ventaneiras.
- Zona de combustão : região à frente das ventaneiras onde ocorre a reação de combustão do ar quente injetado com os combustíveis carregados (coque ou carvão vegetal) e injetados (carvão pulverizado ou gás natural). Esta região, também denominada "raceway", forma uma cavidade na frente das ventaneiras em função da elevada velocidade do ar (200 m/s a 240 m/s em altos fornos a coque) e taxa de combustão.
- Zona de coque estagnante: região conhecida pelos alto-fornistas como "homem morto", constituída por coluna de coque por onde escoam ferro gusa e escória líquidos. O coque ou carvão vegetal desta zona é consumido, de forma lenta, pela dissolução de carbono no ferro líquido. Esta região abrange o cadinho do alto forno que é preenchido de coque e gusa e escória líquidos.

3.2 O processo do alto forno

O alto forno é um complexo reator químico com a presença de fases sólida, gasosa e líquida e no qual ocorre transferência de calor dos gases ascendentes para a carga descendente (combustível e carga metálica).

O ar quente injetado é pré-aquecido nos regeneradores que são constituídos de câmara de combustão e empilhamento de tijolos refratários moldados que formam

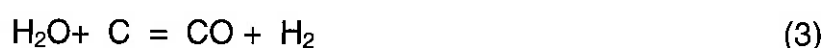
canais de escoamento para os gases e ar soprado. Os regeneradores operam em ciclos alternados de aquecimento e sopro, por combustão de gases e posterior sopro de ar com pré-aquecimento e injeção no alto forno. O ar soprado, proveniente de turbo-soprador, tem sua temperatura elevada de 200° C para 1150°C a 1250°C dependendo do projeto do equipamento. No caso do alto forno 2 da COSIPA a temperatura de sopro pode atingir até 1180 ° C em condições normais de operação. O ar quente injetado nas ventaneiras proporciona a combustão do coque que está acima de 1500° C conforme a reação exotérmica:



O dióxido de carbono reage com o coque através da reação endotérmica de “solution loss” ou reação de Boudouard:



O ar quente injetado possui umidade que reage com o coque, juntamente com o vapor adicional para controle de pressão e marcha do alto forno, produzindo gases redutores conforme a reação:



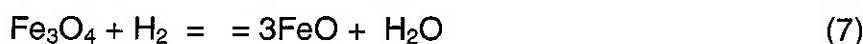
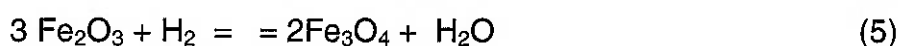
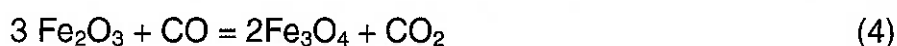
Esta reação é endotérmica mas ocorre em escala bem reduzida, em função da baixa umidade do ar soprado, de modo que o balanço térmico na zona de combustão fornece um saldo altamente positivo de calor para o processo com a temperatura de chama dos gases atingindo 2000 ° C a 2250 ° C.

Os gases ascendentes em processo de reações químicas e trocas térmicas com o combustível e carga metálica, nas diversas regiões da coluna do alto forno, geram uma série de perfis de temperatura que permitem fazer a divisão por zonas conforme segue:

- Zona de preparação e pré-aquecimento, na parte superior do forno, com temperaturas variando de 20° a 800° C.

- Zona de reserva térmica com temperaturas de 800°C a 1000 ° C, na parte intermediária da coluna do forno, em que ocorrem poucos fenômenos de transferência de calor.
- Zona de fusão, na região inferior do forno , com temperaturas de 1000°C a 1500°C.

No processo do alto forno, as reações dos gases ascendentes (CO e H₂) em contracorrente com a carga metálica, denominadas reações indiretas, permitem a redução da wustita (FeO) na parte inferior e intermediária, com formação de ferro e CO₂ ou H₂O. Nas regiões superiores as reações indiretas propoçionam a remoção de oxigênio da hematita (Fe₂O₃) e magnetita (Fe₃O₄) . As reações que ocorrem são representadas a seguir:



Caso o processo de redução indireta seja insuficiente por questões de cinética, redutibilidade de minérios, dentre outros fatores, aumentará a ocorrência de wustita não reduzida na zona inferior do forno, que produzirá ferro por redução direta com o carbono na zona em que as temperaturas estão acima de 1000° C, conforme a equação:



Quanto maior a eficiência do alto forno, maior será o teor de CO₂ nos gases do topo, indicando a máxima utilização do gás redutor CO nas reações indiretas. O maior rendimento de gás é um dos parâmetros de controle do processo (p_{co}) e permite a otimização do consumo de combustível (menor "coke-rate").

3.3 Escoamento do ferro e escória líquidos

O ferro gusa produzido (liga de ferro, carbono, silício, manganês, enxofre e fósforo) normalmente é denominado apenas como gusa. Tanto o gusa como a escória líquidos, que são produzidos na zona de gotejamento, escoam para o cadinho do alto forno, conforme já ilustrado na figura 1. No cadinho preenchido com coque ocorre a presença de zonas com coque e escória, coque e gusa e região sem coque, apenas com circulação de gusa. Durante a operação, o volume interno do cadinho tem alterações causadas pelo desgaste do refratário, que aumenta o volume, e pela formação de cascão, que reduz o volume útil. As forças que atuam na região do cadinho e o estado interno do mesmo são ilustrados na figura 2:

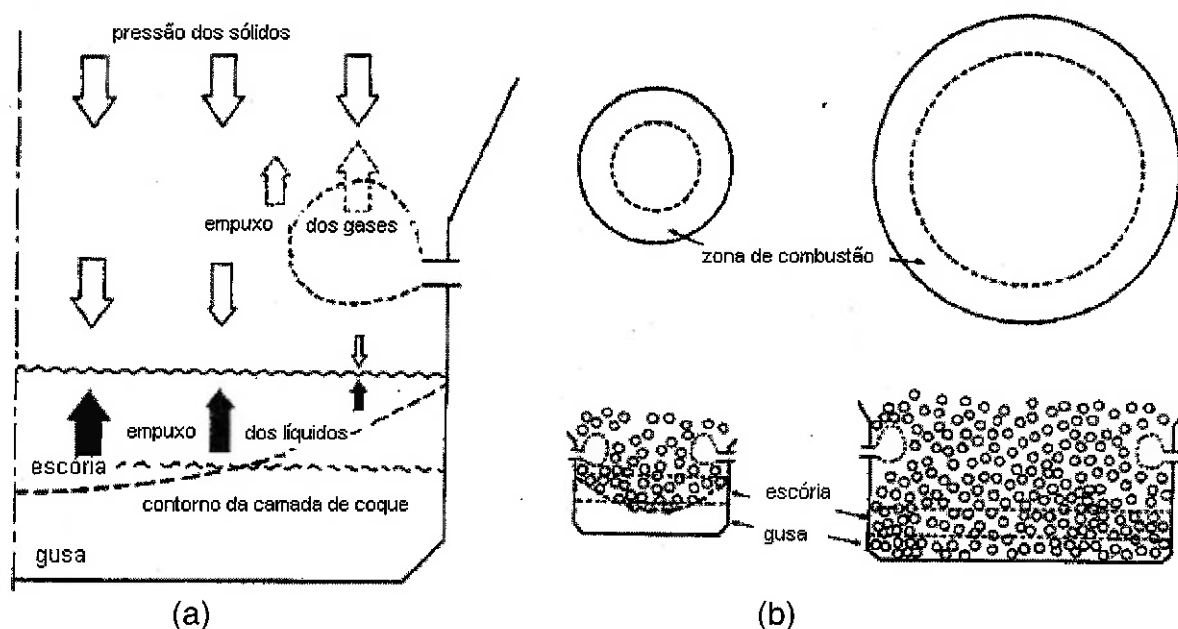


Figura 2 . Ilustração do cadinho segundo Fukutake e Okabe ⁽²⁾ :

- (a) – balanço de forças atuando na camada de coque.
- (b) - estado do cadinho de um pequeno e um grande alto forno.

A remoção destes produtos do alto forno é realizada através da abertura do furo de corrida com uso de uma haste com broca acionada por uma máquina perfuratriz, pneumática ou hidráulica. O escoamento dos líquidos é efetuado por um sistema de canais de corrida, revestidos com refratários, que direcionam o gusa para carro-torpedo e a escória para um tanque de água, para granulação, ou para um poço de emergência. Após enchimento, o carro-torpedo é enviado à aciaria e a escória

granulada é destinada a fábricas de cimento. De acordo com o abaixamento do nível de líquidos no cadinho, ocorre a redução de escoamento de gusa e escória com saída de gases pelo furo de corrida, sendo necessário o encerramento da corrida com o fechamento do furo com massa refratária especial. Dependendo do projeto do alto forno e da produtividade, o padrão de operação das corridas pode variar. Normalmente realiza-se a abertura de uma corrida, num furo, com a corrida do outro furo ainda aberta de modo que o alto forno esteja permanentemente com escoamento de líquidos, objetivando aumentar a segurança operacional com o mínimo de nível de líquidos no cadinho.

A importância do cadinho está relacionada à estabilidade de operação do alto forno, tendo em vista que o escoamento irregular de líquidos vai causar redução de produção e da vida útil do equipamento pois o desgaste dos refratários de carbono, desta região do forno, é que define o fim da vida do equipamento.

Como o processo de produção de gusa e escória é contínuo, o conhecimento e controle da drenagem do cadinho é fundamental para a operação. Dependendo das condições dos furos de corrida, da permeabilidade do homem morto, que depende da qualidade do coque, poderão ocorrer alterações no fluxo de líquidos que vão alterar as condições físicas e térmicas do cadinho com influência sobre a operação e o desgaste do refratário.

Em face da impossibilidade de visualizar de escoamento de líquidos no cadinho, na operação do alto forno, diversos estudos tem sido realizados e apresentados para entender o fenômeno abordando:

- Modelos físicos com experiências em modelos a frio, bi ou tri-dimensionais, para simular o vazamento de uma fase líquida ^(2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15) .
- Estudo dos resultados obtidos em modelos associados a balanços de massa ^(6,15,16,17) .
- Modelos matemáticos com uso de equações de Fenômenos de Transportes ^(7,18,19,20,21,22,23,24,25) .
- Experiências operacionais com uso de traçadores radioativos ^(26,27) e medidas de força eletromotriz na estrutura metálica do cadinho ⁽²⁸⁾ .
- Resultados operacionais de drenagem de cadinho ^(19,21,22,29) .

3.4 Modelos físicos da drenagem do cadinho

Em modelos físicos do processo de drenagem do cadinho, o leito de coque é normalmente representado por um leito de partículas de vidro ou plástico num recipiente transparente. Para representar o ferro gusa líquido, escória líquida e os gases nos modelos, os pesquisadores já utilizaram mercúrio, glicerol, água, parafina, hidrofluorcabono, ZnCl_2 , óleo mineral, ar e nitrogênio^(2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15). Com isto conseguiu-se a observação das interfaces gás-líquido e líquido-líquido durante as experiências de drenagem. Os modelos partiram de concepções simples com estudo bi-dimensional com um líquido até alcançarem modelos tri-dimensionais usando dois líquidos para simular o comportamento do gusa e escória.

As experiências de Fukutake e Okabe⁽²⁾, usando um fluido para representar a escória, foram realizadas com base nas seguintes considerações:

- a forma da superfície da escória determina o tempo de final de corrida quando o gás aparece no furo de corrida.
- o cadinho é preenchido com coque e a escória flui através do leito de coque.

Estes estudos mostraram que a superfície da escória é inclinada na direção do furo de corrida durante o escoamento da mesma e ao final da corrida, no momento da saída de gás pelo furo, uma substancial quantidade de escória ainda permanece no cadinho. Conforme este estudo, como a viscosidade do gusa é da ordem de 100 vezes inferior à da escória, a quantidade residual de gusa é considerada muito baixa comparada com a da escória.

Tanzil et al.⁽⁴⁾, utilizaram o dispositivo da figura 3 para observarem o comportamento de dois líquidos imiscíveis em fluxo bi-dimensional através da substituição do leito por um fluxo viscoso análogo.

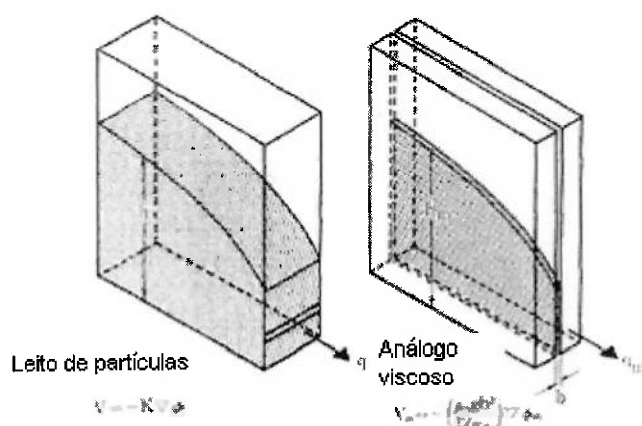


Figura 3 – Fluxo viscoso análogo para fluxo em leito de partículas e fluxo entre duas placas paralelas, segundo Tanzil et al ⁽⁴⁾ .

O fluxo viscoso análogo é baseado na similaridade entre as equações diferenciais que governam o fluxo viscoso de um líquido através de um leito de partículas (Lei de Darcy) e aquele para o fluxo de um líquido viscoso entre duas placas paralelas bem próximas. O orifício do qual o fluido foi retirado (o furo de corrida) foi conectado a uma válvula, ligada a uma câmara de evacuação, permitindo uma grande faixa de taxas de retirada do fluido. Os fluidos experimentais usados foram ar, várias misturas de glicerol/água e mercúrio. Estes são os análogos experimentais para o gás de alto forno, escória e gusa, respectivamente. Antes de cada experimento de drenagem o modelo foi preenchido com mercúrio e mistura de glicerol-água para os níveis desejados até que os conteúdos atingissem equilíbrio gravitacional, isto é, ambas as interfaces gás-líquido e líquido-líquido ficassem na posição horizontal. Cada experimento de drenagem consistiu de abertura do furo de corrida (válvula) e registro fotográfico das posições das interfaces em função do tempo até que a interface gás-líquido atingisse o furo de corrida. Os resultados experimentais de Tanzil et al. ⁽⁴⁾ mostraram que:

- com a interface líquido-líquido acima do nível do furo de corrida, apenas o mercúrio flui continuamente e as interfaces entre fluidos permanecem horizontais.
- Quando a interface mercúrio-glicerol atinge o nível do furo, ambos os líquidos fluem e a interface ar-glicerol vai se inclinando em direção ao furo enquanto a interface mercúrio-glicerol vai inclinando-se para baixo do furo.

- Ao final da experiência verificou-se que o nível médio de mercúrio estava abaixo do nível do furo de corrida e um considerável volume de fase mais viscosa (glicerol) permaneceu no modelo, sem drenar.

Em síntese, na experiência de Tanzil et al. ⁽⁴⁾, um volume considerável da fase mais densa (mercúrio), equivalente ao ferro gusa no alto forno, foi drenada a níveis bem abaixo do furo de corrida e a interface da fase menos densa, equivalente à interface escória-gás no alto forno, vai se inclinando em direção ao furo até a saída de gás pelo furo. Ao contrário, a interface gusa-escória pode ficar abaixo do furo e ter movimento ascendente durante a corrida. Segundo os pesquisadores⁽⁴⁾, o comportamento da drenagem observado nestas experiências pode ser entendido pela consideração da magnitude relativa das forças viscosas e gravitacionais agindo nas interfaces individuais. Por causa da natureza convergente do fluxo, velocidades nas proximidades do furo de corrida são altas e substanciais gradientes de pressão localizados são estabelecidos próximos ao furo. As forças viscosas associadas agem para puxar para baixo a interface superior (gás-líquido) e para cima a interface inferior, ambas em direção ao furo. A força gravitacional opõe qualquer desvio da interface da horizontal. O movimento e formato resultante das interfaces dependem da relação da força viscosa/ força da gravidade.

Ainda de acordo com Tanzil et al.⁽⁴⁾, no estudo experimental da drenagem do cadinho, Fukutake e Okabe⁽²⁾ assumiram que a interface gusa-escória permanece horizontal ao nível do furo de corrida durante a drenagem da fase escória, isto é, nenhuma drenagem de gusa ocorre abaixo do nível do furo. Desde que a correlação daqueles pesquisadores não considera o efeito da fase gusa no fluxo da escória, e ignora completamente a drenagem do gusa abaixo do nível do furo de corrida, Tanzil et al. ⁽⁴⁾ comentam que estas estimativas do nível de líquidos no cadinho podem estar com erro considerável, particularmente para condições onde a taxa de drenagem de escória é alta.

McCarthy et al. ⁽³⁾ realizaram um estudo teórico e experimental do comportamento de drenagem de leito bi-dimensional com uma saída na lateral do leito objetivando identificar os mecanismos fundamentais envolvidos. Sob estas condições, verificaram que um gradiente desenvolve-se na interface ar-líquido, na direção do fluxo, com a interface inclinando-se em direção à saída. Isto resultou num significativo volume de líquido sendo retido no leito ao final da drenagem quando a interface alcançou a saída. O volume residual de líquido e a forma da interface ar-

líquido foram determinados experimentalmente em função do tempo num leito bi-dimensional com partículas de vidro, de diâmetros de 0,6 mm a 10 mm, com velocidades superficiais de líquido variando de 0,007 a 0,32 cm/s. Os líquidos usados foram água, soluções de água/glicerina e querosene resultando em viscosidade na faixa de 1 a 10 mPa.s e tensão superficial de 0,0243 a 0,072 N/m. Assumindo fluxo laminar dentro do leito, os autores⁽³⁾ desenvolveram um modelo computacional para prever tanto o residual de líquido quanto o perfil de drenagem no leito com o tempo. O comportamento lateral da drenagem de um leito bi-dimensional foi estudado experimentalmente em termos de volume residual de líquido e perfil de drenagem dentro do leito como função de:

- taxa de drenagem;
- tamanho de partículas do leito;
- viscosidade do líquido e tensão superficial;
- nível de líquido inicial acima da saída do leito.

O estudo incluiu leitos homogêneos e heterogêneos. Os resultados obtidos no modelo tiveram boa concordância com os resultados experimentais em todos os intervalos e condições investigados. O modelo computacional foi usado para estimar a importância relativa dos efeitos de mudanças nas condições do cadinho sobre o residual de escória para operações típicas de altos fornos.

Em seus estudos, Nouchi et al.⁽¹²⁾ desenvolveram um modelo físico simulando o cadinho usando recipiente cilíndrico de vidro (diâmetro de 0,4m x 0,35 m de altura) com válvulas de saída e partículas de plástico de 6 mm de diâmetro representando o coque. Para simular o gusa foi utilizado o hidroclorofluorcarbono (HCFC) e para a escória foi usada parafina líquida. Os líquidos foram abastecidos uniformemente através de uma distribuidor e drenados pelas válvulas que simularam os furos de corrida. A pressurização do recipiente foi efetuada com N₂ a uma pressão de 30 KPa. O modelo físico é ilustrado na figura 4:

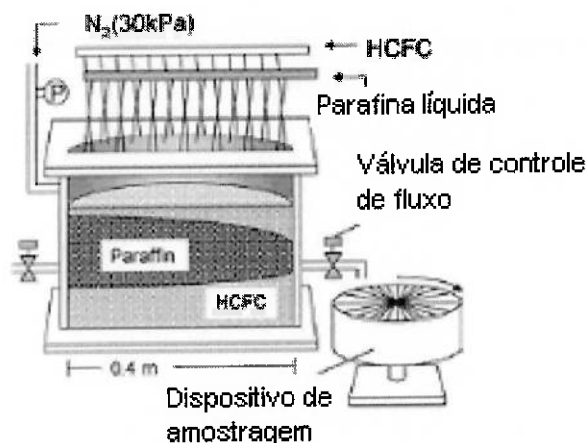


Figura 4 - Ilustração esquemática do modelo físico do cadinho do alto forno segundo Nouchi et al. ⁽¹²⁾ .

O modelo em escala reduzida procurou reproduzir o formato da superfície líquida pois o mesmo afeta a estabilidade da operação do alto forno. Na figura 5 mostra-se o diagrama esquemático da superfície da escória.

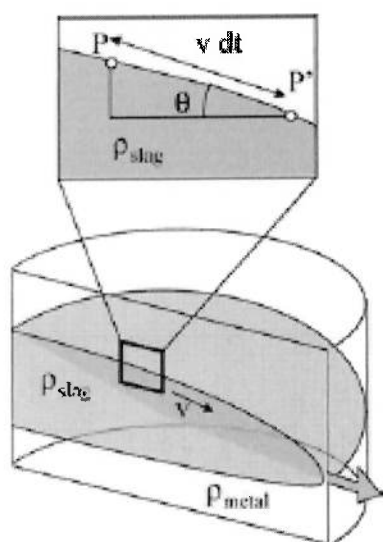


Figura 5 - Diagrama esquemático do balanço de forças na superfície da escória segundo Nouchi et al. ⁽⁴⁰⁾ .

A queda de pressão entre P e P' causada pelo fluxo de líquidos, ΔP_{fluxo} , deve ser compensada pela pressão hidrostática ($\Delta P_{\text{gravidade}}$). Esta queda de pressão, ΔP_{fluxo} , pode ser descrita pela equação de Kozeny-Carman:

$$\Delta P_{\text{fluxo}} = \frac{180\mu_{\text{escória}}}{d_p^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} v(vdt) \quad (13)$$

onde

$v(\text{m/s})$ = velocidade do líquido

$d_p (\text{m})$ = diâmetro de partículas

ε = fração de vazios do leito ("coque"),

$\mu_{\text{escória}} (\text{Pa.s})$ = viscosidade da escória

Para manter a inclinação θ , a queda de pressão tem que ser compensada pela pressão hidráulica $\Delta P_{\text{gravidade}}$ que pode ser descrita pela equação:

$$\Delta P_{\text{gravidade}} = \rho_{\text{escória}} g \sin \theta (vdt), \quad \text{donde} \quad \sin \theta = \frac{180\mu_{\text{escória}}}{\rho_{\text{escória}} g d_p^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot v \quad (14)$$

Para reproduzir o formato da superfície da escória no cadinho, θ deveria ser mantido no experimento levando a:

$$\frac{180\mu_{\text{escória}}}{\rho_{\text{escória}} g d_p^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot v = \frac{180\mu'_{\text{escória}}}{\rho'_{\text{escória}} g d'_p{}^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon')^2}{\varepsilon'^3} \cdot v' \quad (15)$$

Assim os fatores de escala da velocidade superficial v^* , velocidade volumétrica v^*_{vol} , comprimento l^* e tempo t^* foram descritas por equações, mostradas no estudo ⁽¹²⁾, como a apresentada abaixo para a velocidade superficial:

$$v^* = \frac{v}{v'} = \frac{\rho \mu' [d_p \cdot (1-\varepsilon')]^2}{\rho' \mu [d'_p \cdot (1-\varepsilon)]^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{\varepsilon'^3} \quad (16)$$

onde:

v = velocidade superficial no alto forno.

v' = velocidade superficial no modelo de escala reduzida.

ρ = densidade do líquido no alto forno

ρ' = densidade do líquido no modelo de escala reduzida.

d_p = diâmetro da partícula no alto forno.

d'_p = diâmetro da partícula no modelo de escala reduzida.

ε = fração de vazios no leito do alto forno.

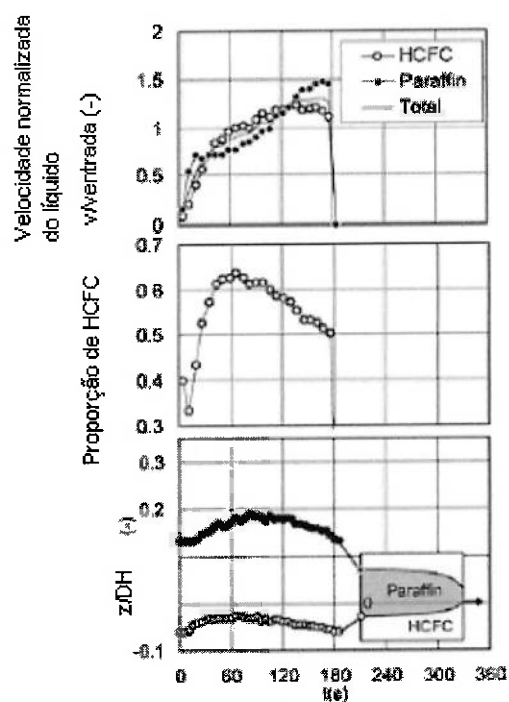
ε' = fração de vazios de modelo de escala reduzida.

As condições experimentais para correspondente a um alto forno com produção de 10.000 t/dia são mostrada na tabela 1:

	Alto forno (10.000 t/dia)	Modelo em escala reduzida (metade de cilindro)
Diâmetro do cadinho - D_H	15,0 m	0,40 m
Diâmetro de partícula - d_p	$2,4 \times 10^{-2}$ m	$6,0 \times 10^{-3}$ m
Fração de vazios do leito - ε	0,300	0,383
Densidade da escória - ρ_{esc}	2800 kg/m ³	0,828 kg/m ³
Viscosidade da escória - $\mu\rho_{esc}$	$4,5 \times 10^{-1}$ Pa.s	$9,5 \times 10^{-3}$ Pa.s
Produção de escória - V_{esc}	$1,24 \times 10^{-2}$ m ³ /s	$2,4 \times 10^{-5}$ m ³ /s
Densidade do gusa - ρ_{gusa}	6700 kg/m ³	1780 kg/m ³
Viscosidade do gusa - ρ_{gusa}	$6,0 \times 10^{-3}$ Pa.s	$1,42 \times 10^{-3}$ Pa.s
Produção de gusa - V_{gusa}	$1,72 \times 10^{-2}$ m ³ /s	$1,39 \times 10^{-5}$ m ³ /s
Fator de escala da velocidade superficial - v^*	0,441	
Fator de escala da velocidade volumétrica - v^*	620	
Fator de escala do comprimento - l^*	37,5	
Fator de escala do tempo - t^*	85	

Tabela 1 – Condições do modelo experimental de Nouchi et al. ⁽¹²⁾.

Parte do resultados das experiências realizadas são mostrados nos gráficos da figura 6:



z = nível de líquido DH = diâmetro do cadinho

Figura 6 - Evolução com o tempo da velocidade do líquido, proporção de HCFC e nível de líquidos segundo Nouchi et al. ⁽¹²⁾.

Os resultados mostram que a velocidade de drenagem do HCFC (“gusa”) aumenta nos primeiros 60 s e depois cai. Por outro lado a velocidade de drenagem da parafina (“escória”) aumenta após 60 s, atingindo o máximo após 90 s. A proporção de HCFC e o nível são máximos ao mesmo tempo em todas as condições de experiência. Medidas de vazão e tempo em altos fornos com produção de 10.000 t/dia e diâmetro de cadinho de 15 m, embora com escala de tempo 85 vezes superior ao do modelo reduzido, mostraram comportamento similar conforme mostram os gráficos da figura 7 para dados reais de alto forno. De acordo com Nouchi et al.⁽¹²⁾, isto mostrou a confiabilidade do modelo experimental desenvolvido

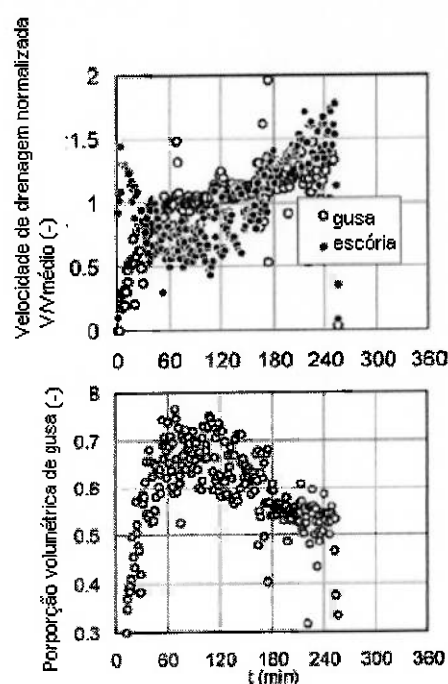
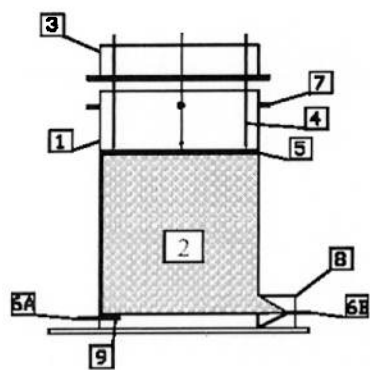


Figura 7 - Medida de velocidade de drenagem e proporção de gusa em alto forno real segundo Nouchi et al.⁽⁴⁰⁾

Chen et al.^(13,30) desenvolveram um modelo físico bi-dimensional⁽¹³⁾ usando água e traçadores coloridos que, posteriormente evolui para um modelo físico tri-dimensional⁽³⁰⁾ conforme a figura 8:



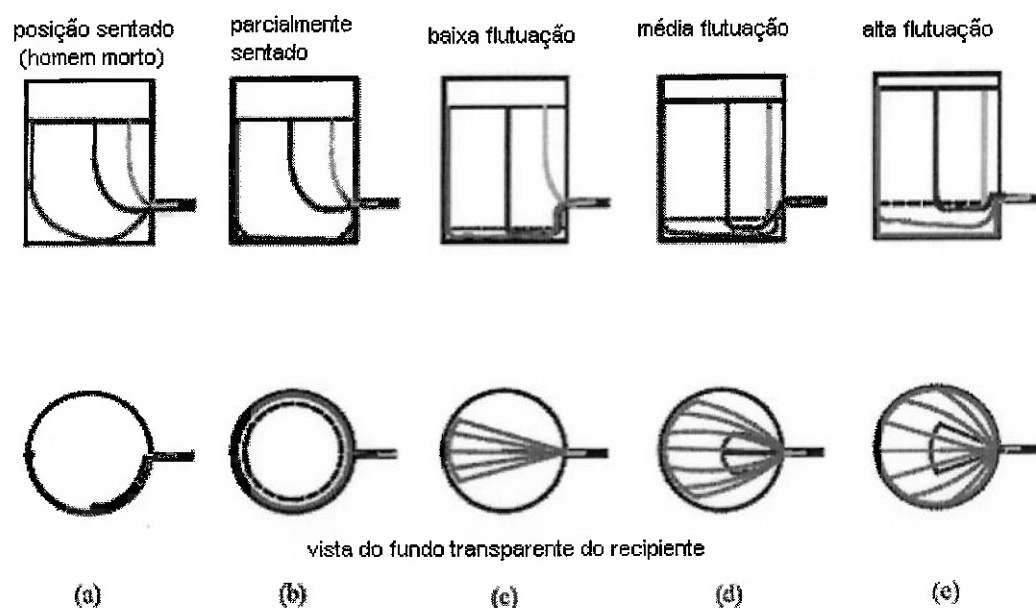
- 1 – tanque cilíndrico de água com diâmetro de 15 cm.
- 2 – leito de partículas de vidro
- 3 – Suprimento e distribuição de água
- 4 – Sistema de injeção de traçadores coloridos
- 5 – Tela
- 6 – Furo de corrida
- 6A - razão de esgotamento de 0,3
- 6B – razão de esgotamento de 0,5
- 7 - Ladrão (overflow)
- 8 – bloco representando o furo erodido.
- 9 – Furo alongado pelo tamanho do cogumelo.

Figura 8 - Modelo físico tri-dimensional do cadinho por Chen et al. ⁽³⁰⁾.

O modelo foi constituído por um tanque cilíndrico de 15 cm de diâmetro carregado com partículas de plástico de diferentes tamanhos. Os modelo de fluxo e velocidade foram observados através de traçadores de cor adicionados em diferentes posições do leito de partículas e filmado com o uso de uma câmera, principalmente do fundo transparente do tanque. As experiências foram conduzidas em condições de estado estacionário através da manutenção de um nível hidrostático constante.

Foram quatro séries de experiências variando a granulometria das partículas, a permeabilidade da periferia e centro, a posição do “homem morto” (sentado ou flutuante em vários níveis) e o comprimento de furo (variando de 0,5 a 5,5 cm).

No caso de leito de partículas uniformes, observou-se que a resistência ao fluxo de líquidos na região da parede é menor do que no interior do leito e, quando o homem morto flutua, a resistência ao fluxo é bem menor na região livre abaixo do leito. A figura 9 ilustra o fluxo obtido com os traçadores coloridos:



Modelos de fluxo para a razão de profundidade ($h_{\text{furo}}/r_{\text{cadinho}}$) de 0,30 e diferentes alturas de camada no fundo : (a) 0 cm , (b) Parcialmente sentado, (c) 0,50 cm , (d) 1,00 cm, (e) 2,50 cm.

Figura 9 - Ilustração do fluxo no modelo físico tri-dimensional do cadinho simulando condições do homem morto para leito homogêneo de partículas por Chen et al. ⁽³⁰⁾.

Utilizando partículas de diferentes tamanhos e variando a posição do homem morto em relação ao fundo observou-se que a região livre de partículas do fundo é um atalho para o fluxo de líquidos. O líquido no núcleo de alta permeabilidade flui mais rápido do que em outra região. O líquido proveniente da região de baixa permeabilidade flui numa trajetória direcionada para a região de alta permeabilidade. Basicamente, os modelos físicos desenvolvidos mostram que a interface escória-gás tem inclinação na direção do furo de drenagem, que é possível a drenagem de gusa em nível abaixo do furo de corrida e que o principal fator de influência é a granulometria do leito de partículas.

3.5 Modelamento matemático do fluxo de líquidos no cadinho

Estudos sobre o cadinho levam em consideração transferência de energia, convecção natural, fluxo em leito poroso e grande faixa de variação de geometria, velocidades, condições de simulação e condições operacionais reais^(6,20,28,30). Assim

sendo, diferentes e complementares estudos e experimentos vêm sendo desenvolvidos, principalmente trabalhos de modelamento matemático, em busca de contínuos aprendizados sobre fluxos de líquidos e gases e sua relação com a permeabilidade no cadinho, assim como, sua relação com todos os fenômenos internos do alto-forno ^(7,9,18,19,21,24,30). Portanto, uma maneira de monitorar as informações internas do reator é por meio de modelos matemáticos, os quais consideram mudanças dinâmicas no cadinho ⁽¹⁷⁾. No final dos anos 1990, as técnicas de Computação Fluido Dinâmica (CFD) e “softwares” comerciais de CFD com capacidade computacional foram desenvolvidos para manusear mais realistas e complicadas geometrias e condições de contorno conforme Elsaadawy et al.⁽³⁴⁾. Diversos modelos matemáticos vêm sendo desenvolvidos e divulgados na literatura. Em sua maioria, são baseados no método de diferenças finitas, e simulados para fluidos no interior do cadinho do alto-forno^(6,9,10). 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⁽³²⁾. Determinados estudos ^(31,32,37) indicaram que ocorre significativa recirculação do fluido, causada 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. Verificou-se que as forças de empuxo levam a uma recirculação do fluido, principalmente quando o homem morto está flutuando. Entretanto, outros modelos consideram clara a alteração da velocidade próxima à parede refratária, mas consideram que a convecção natural não é relevante.

Nishioka et al. ^(9,10) desenvolveram um modelo, baseado no método de diferenças finitas, para simular o fluxo de gusa e escória no cadinho. Os resultados de suas pesquisas mostraram 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.

Em relação ao controle da drenagem, Nouchi et al.^(11,12) 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 dificultam a chegada da escória ao furo de gusa. Também afirmaram que a quantidade de escória residual aumenta proporcionalmente ao quadrado da produção.

Os estudos sobre o fluxo de líquidos no cadinho são fundamentados, basicamente, no balanço de massa e de força, na equação de Navier-Stokes e em equações que representem a resistência interna no alto forno à passagem do material líquido, normalmente equação de Ergun ou de Carman.

Na maioria das vezes, o cálculo é feito assumindo as seguintes condições ⁽⁸⁾ :

- o líquido é uniformemente gotejado no cadinho;
- o nível de gusa é constante e tido como horizontal;
- inexistência de escória;
- metade do cadinho é escolhida como região de domínio;
- a camada de coque é tratada como leito poroso;
- 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, dos parâmetros de sopro e balanço de massas, com base na composição da carga carregada, considerando condições quase estacionárias ⁽¹⁷⁾ .

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. Em alguns casos, o fluxo de gusa é calculado baseando-se em medidas de líquidos no carro-torpedo, enquanto que o fluxo de escória é calculado pela mudança no sinal de pressão no sistema de granulação ⁽¹⁶⁾ . A medição de nível da escória não existe mas o controle desta variável é necessário para se evitar o acúmulo de escória.

Brännbacka et al. ⁽¹⁷⁾ desenvolveram um modelo de simulação do nível de líquidos no cadinho sem considerar a forma de escoamento no interior e assumindo a fração de vazios no homem morto como constante. 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. A estimativa do nível de líquidos pode ser efetuada por medidas de pressão mas esta técnica é apropriada para períodos breves de medição, e não para uso na rotina de controle operacional diária do alto forno ⁽²⁴⁾ . O cálculo do nível de gusa é uma estimativa do nível real no cadinho, mas o grau da variação depende fortemente da fração de vazios do homem morto e de

seu comportamento de flutuação. Já o cálculo estimado do nível de escória monitora tendência, apesar de não refletir o valor real.

Nishioka et al.^(9,10), em seus estudos, consideraram a variação da velocidade e sua influência no perfil de escoamento do fluido. Usaram o método VOF (Volume of Fluid Method), usualmente utilizado em fronteiras livres em malhas tridimensionais, para distinção das interfaces (gás-escória e escória-gusa)

Takatani et al.⁽¹⁹⁾ desenvolveram um modelo baseado no fluxo de líquidos para avaliação dos fatores que influenciam na erosão do cadinho. Nesse sistema, balanços de força e de momento são requeridos para o gusa, e balanços de energia para gusa e refratários. As equações de Navier-Stokes (equações 17 a 19) governam o processo. A velocidade é representada por U e F_R representa a resistência ao fluxo, obtida pela equação 20, de Ergun⁽¹⁹⁾.

Equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \nabla (\varepsilon\rho U) = 0 \quad (17)$$

Equação de conservação de quantidade de movimento:

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho (U \cdot \nabla) \cdot U = \nabla p - \mu \nabla^2 U + F_R \quad (18)$$

em que,

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

Equação de conservação de energia:

$$\rho \frac{\partial(C_p T)}{\partial t} + \rho (U \cdot \nabla) C_p T = \nabla (k \nabla T) \quad (19)$$

Equação de Ergun:

$$F_R = \left\{ 150 \left[\frac{(1-\varepsilon)}{(\varepsilon d_p \phi)} \right]^2 \mu + 1,75 \left[\frac{(1-\varepsilon)}{(\varepsilon d_p \phi)} \right] \rho |U| \right\} U \quad (20)$$

Em que

F_R - resistência ao fluxo

ε : fração de vazios do leito

ϕ : esfericidade das partículas

d_p : diâmetro das partículas

μ : viscosidade da escória (Poise)

ρ : densidade da escória (kg/m³)

V_0 : velocidade superficial do líquido através da seção transversal do leito

U : velocidade do fluido (m/s)

As principais condições de contorno adotadas foram ⁽¹⁹⁾ :

- a temperatura e o fluxo de metal são conhecidos no limite superior do cadinho;
- 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 é estimada a partir da análise de força no interior do forno.

Chew et al.⁽³³⁾ estudaram um modelo para descrever o fluxo de líquido no cadinho, avaliando a influência da zona interna no perfil de escoamento. No modelo consideraram o cadinho como um cilindro que apresenta permeabilidade diferente ao longo do raio, além de outras considerações.

A zona de fluxo de líquido foi caracterizada por:

- fração de vazios, ϵ ;
- os raios R do cadinho e r correspondente ao raio da zona impermeável;
- homogeneidade da alimentação de líquidos;
- altura dos líquidos, h .

O modelo numérico, considerando a heterogeneidade no cadinho, foi desenvolvido para fluxo laminar porque, a não ser nas proximidades do furo de gusa, o número de Reynolds (Re) é igual a 0,76.

No cálculo da fração de vazios, foram considerados os espaços ocupados pela escória, os quais variaram no cálculo de 0,40 a 0,60 para a região permeável anelar, e 0,10 a 0,30 para a região central impermeável.

Inicialmente foi verificado que os cálculos para o caso de cadinho homogêneo mostraram boa concordância com as leis observadas no modelo físico. No estudo de um modelo heterogêneo do cadinho, os cálculos resultaram numa elevação significativa 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. Observou-se também que com o aumento da região central impermeável, a quantidade de líquido que flui nos limites, correspondentes à fronteira do homem morto, se torna muito importante. Esse comportamento poderia levar a maior retenção de material na zona periférica com o crescimento do tamanho da região impermeável central. Os resultados obtidos estão de acordo com os medidos pelos traçadores radioativos.

De acordo com Chew et al. ⁽³³⁾, a distribuição radial através da camada de coque afeta as propriedades físicas do líquido e a vazão do gás. A camada de coque é influenciada pelo arraste e pela quantidade do gás na zona coesiva que, por sua vez, é controlada pela distribuição radial de minério/coque. A estrutura da zona coesiva 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 típico ao longo da zona coesiva.

Nishioka et al. ^(6,9,10) estudou o efeito de diversas variáveis como o diâmetro do coque, fração de vazios, distribuição granulométrica do coque, espaço livre de coque, zona impermeável, viscosidade da escória na taxa de drenagem do cadinho do alto forno, na forma da interface gás-escória, gusa-escória, altura máxima da interface gás-escória, usando um modelo matemático tridimensional. O modelo foi desenvolvido considerando a conservação de momento para um fluxo de fluido (gusa, escória) em estado não estacionário. A força de arraste líquido-sólido no leito de coque foi avaliada pela expressão de Kozeny-Carman. Num espaço livre de coque, a equação de Navier-Stokes, que considera o termo de advecção, os termos de difusão e gradiente de pressão, foi usada como a equação dominante.

Para a determinação das propriedades dos fluidos em cada célula computacional os autores^(9,10) consideraram a proporção de gás, gusa e escória em cada célula. O método VOF (volume of fluid method) foi aplicado para o cálculo de interfaces (gás-escória e escória-gusa). Um valor unitário de VOF_1 corresponderia a uma célula cheia de líquido. Um valor unitário de VOF_2 corresponderia a uma célula cheia de gusa. Células com valores VOF_2 entre zero e um devem então conter interfaces gusa-escória. A razão de escória/gusa de cada célula é calculada de VOF_1 e VOF_2 . Propriedades de cada célula foram determinadas pelo peso médio de fluidos (gás, escória, gusa) existente numa célula. Equações de diferença foram derivadas das

equações básicas com o método de diferenças finitas. Neste modelo, a análise numérica procedeu-se conforme as seguintes condições ⁽¹⁰⁾ :

1. gusa e escória gotejados na superfície de gusa e escória, respectivamente.
2. propriedades do fluido no furo de corrida foram dados pela média ponderada das propriedades de gusa e escória existentes na célula mais próxima do furo.
3. a distribuição de velocidades do gusa e escória no cadinho foi calculada pelo modelo de estimativa de fluxo de fluidos com a taxa de escoamento total como condição de contorno.
4. as interfaces de gás-escória e gusa-escória moveram-se de acordo com a distribuição de velocidades.
5. a pressão de fluxo interna no furo foi obtida do modelo de estimativa de fluxo de fluidos.
6. A multiplicação da taxa de escoamento total pela fração de volume de gusa e escória na célula mais próxima do furo de corrida forneceu a taxa de escoamento de gusa e escória.
7. estas etapas foram repetidas até que a interface gás-escória alcançasse o furo de corrida.
8. quando a interface gás-escória alcançou o furo de corrida, o furo foi fechado; se o comportamento do fluxo de fluídos e modelos de taxa de escoamento não alcançassem estado quase-estacionário, o outro furo de corrida era aberto, e o procedimento anterior era repetido para a próxima corrida.

As condições para cálculos no trabalho de Nishioka et al. ^(9,10) foram:

- temperatura do cadinho de 1773 K (1500°C).
- composição da escória em massa de 0,3%FeO, 34%SiO₂, 15%Al₂O₃, 42%CaO e 6,5%MgO.
- propriedades do ferro e escória foram dadas em função de sua composição e temperatura.
- pressão de saída do furo de corrida foi fixada em $1,0 \times 10^5$ Pa; a pressão interna no furo foi obtida do modelo de estimativa de fluxo de fluidos a cada vez.
- ferro e escória líquidos gotejaram uniformemente nas superfícies de gusa e escória respectivamente, porque os efeitos de modelos de gotejamento de ferro e escória nas superfícies eram desprezíveis.
- forças interativas entre ferro e escória durante a passagem de ferro pela fase escória não foram considerados no modelo.

- números de células na rede era 15 (r) x 22(z) x 32 (θ) e incremento de tempo foi estabelecido no menor valor possível para satisfazer a estabilidade numérica.

Na literatura diversos outros estudos ^(15,16,21,23,24,25,31,35,36,37,38,39) abordam o modelamento matemático de escoamento de líquidos no cadinho na tentativa de entender os fenômenos.

3.6 Fatores operacionais que influenciam a drenagem do cadinho

De acordo com a experiência e a literatura consultada, pode-se afirmar que os principais fatores que afetam o nível de líquidos no cadinho, especialmente o nível de escória, são:

- permeabilidade do leito do cadinho (homem morto).
- ritmo de produção.
- viscosidade da escória.
- comprimento de furo.
- localização do furo de gusa.
- diâmetro do furo de corrida .

A seguir apresentar-se-á uma síntese da influência destes fatores na drenagem do cadinho com base na literatura técnica.

3.6.1 Permeabilidade do leito do cadinho.

Conforme já comentado, o leito de coque do cadinho é denominado usualmente pelo termo homem-morto e a permeabilidade vai depender da qualidade do coque consumido. As experiências de Fukutake e Okabe⁽²⁾, usando um fluido para representar a escória, mostraram que a superfície da escória é inclinada na direção do furo de corrida durante o escoamento da mesma e ao final da corrida, no momento da saída de gás pelo furo, uma substancial quantidade de escória ainda permanece no cadinho. De acordo com Fukutake e Okabe⁽²⁾, a proporção de escória residual, α , está relacionada com o coeficiente de fluxo FL definido pela equação (12):

$$F_L = \left\{ 180 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{1}{\phi^2 d^2} \cdot \frac{\mu}{\rho g} \right\} V_0 \left[\frac{D}{H} \right]^2 \quad (12)$$

onde:

ε : fração de vazios do leito

ϕ : esfericidade das partículas

d : diâmetro das partículas

μ : viscosidade do fluido

ρ : densidade do líquido

V_0 : velocidade superficial do líquido através da seção transversal do leito

g : aceleração da gravidade

H : a altura da camada inicial de escória acima do base do leito.

D : diâmetro do leito particulado.

Na figura 10 mostra-se o gráfico obtido relacionando α com F_L :

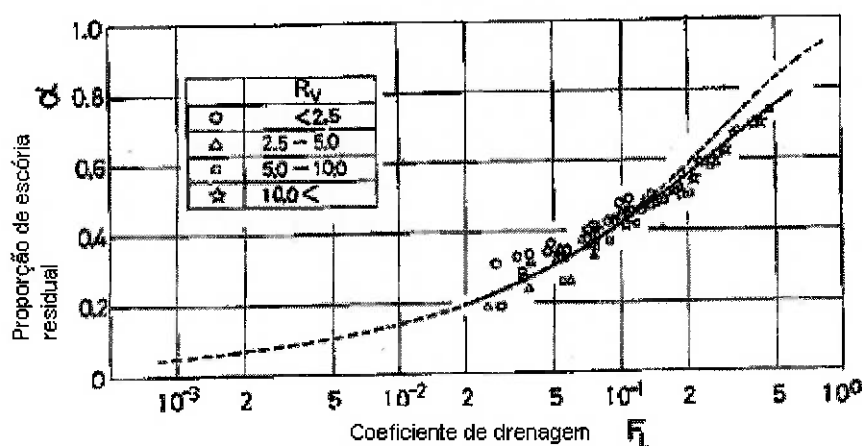


Figura 10. Relação entre a proporção de escória residual e coeficiente de drenagem F_L de acordo com Fukutake e Okabe⁽²⁾.

Segundo estes pesquisadores, a proporção residual, α , aumenta com a diminuição da permeabilidade do leito de coque ("homem morto").

McCarthy et al.⁽³⁾ em seu modelo de estudo registram que quando a fração de finos no homem morto aumenta para 30% a quantidade de escória residual dobra.

Assumindo fluxo laminar dentro do leito, desenvolveram um modelo computacional para prever tanto o residual de líquido quanto o perfil de drenagem no leito com o

tempo. O comportamento lateral da drenagem de um leito bi-dimensional foi estudado experimentalmente em termos de volume residual de líquido e perfil de drenagem dentro do leito como função de taxa de drenagem, tamanho de partículas do leito, viscosidade do líquido e tensão superficial e nível de líquido inicial acima da saída do leito. O modelo computacional foi usado para estimar a importância relativa dos efeitos de mudanças nas condições do cadinho sobre o residual de escória para operações típicas de altos fornos. Com base nos resultados computados os autores concluíram que a qualidade do coque é o principal parâmetro que afeta a performance da drenagem. .

Nouchi et al.⁽¹²⁾ comentam que existe uma zona de baixa permeabilidade (ZBP) em alguns cadinhos de altos fornos e embora o seu formato não seja claro o efeito do seu tamanho na eficiência da drenagem foi estudado, num modelo físico, colocando um cilindro sólido menor no interior do cilindro experimental conforme a figura 11:

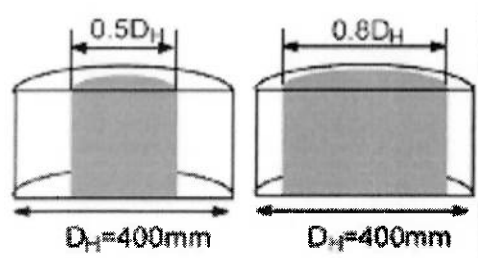


Figura 11 - Zona de baixa permeabilidade no modelo do cadinho desenvolvido por Nouchi et al.⁽¹²⁾ .

Medidas de taxa de HCFC e nível de líquidos sob condições de suprimento uniforme mostraram, conforme figura 12, que embora a duração da corrida seja constante, a proporção de de HCFC ("gusa") aumenta à medida que a ZBP aumenta, assim como o nível máximo de parafina ("escória"). Isto mostra que aumento da ZBP aumenta o nível de escória no cadinho e este fenômeno pode ser detectado pela medida do intervalo de escória na corrida.

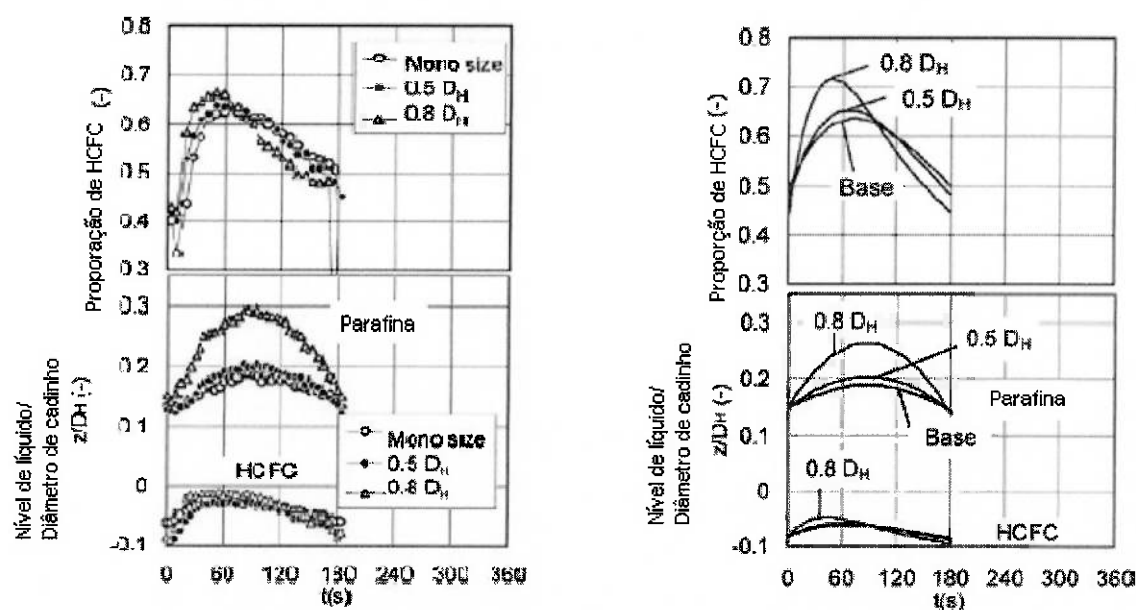


Figura 12 - Efeito da zona de baixa permeabilidade (ZBP) no nível de líquidos segundo Nouchi et al. ⁽¹²⁾.

O efeito do diâmetro do coque D_p e fração de vazios ε , no máximo nível de escória são mostrados na figura 13:

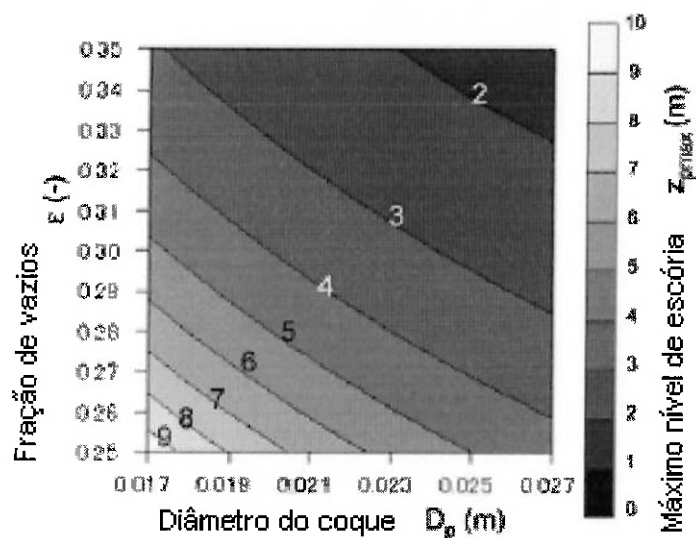


Figura 13 - Efeito do diâmetro do coque e fração de vazios no máximo nível de escória segundo Nouchi et al. ⁽¹²⁾.

Embora diversos fatores afetem o nível máximo de escória, os efeitos da produção e permeabilidade são especialmente fortes porque o nível máximo é diretamente proporcional ao quadrado da produção e inversamente proporcional à fração de vazios conforme os estudos de Nouchi ⁽¹²⁾. Isto significa que a qualidade do coque é mais importante do que a qualidade do síter e basicidade para reduzir o nível de escória no cadinho em operação com alta produtividade.

Chen et al. ^(13,30) realizaram quatro séries de experiências, usando traçadores coloridos e variando a granulometria das partículas, a permeabilidade da periferia e centro. Tanto no caso de leito de partículas uniformes, já mostrado na figura 9, quanto no caso de leito de partículas heterogêneas, mostrado na figura 14, a resistência ao fluxo de líquidos na região da parede é menor do que no interior do leito e, quando o homem morto flutua, a resistência ao fluxo é bem menor na região livre abaixo do leito. A figura 14 ilustra o fluxo obtido com os traçadores coloridos.

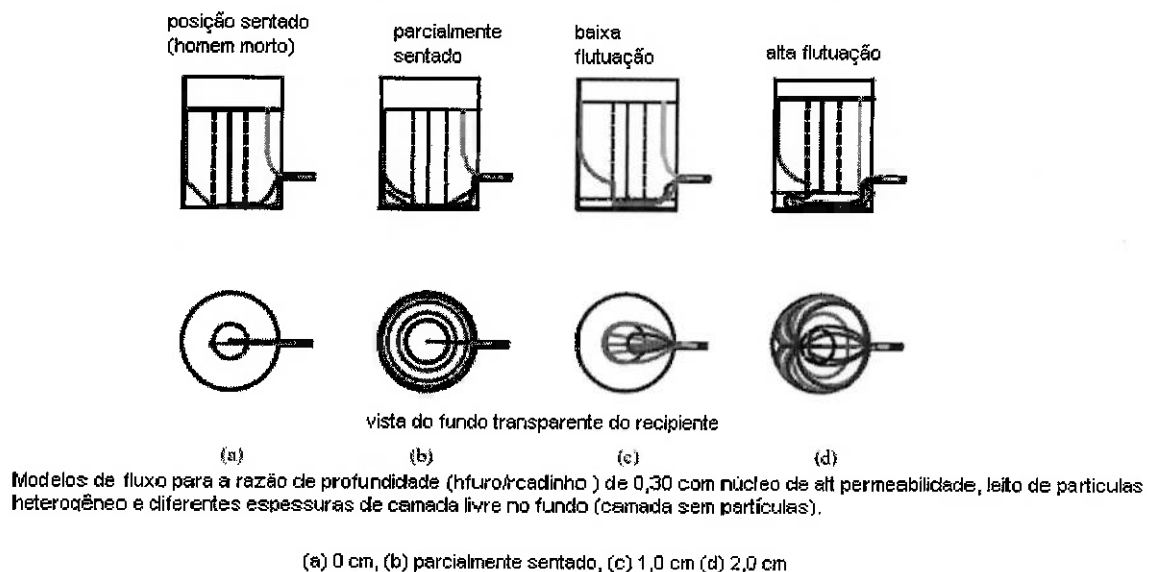


Figura.14 - Ilustração do fluxo no modelo físico tri-dimensional do cadinho com leito heterogêneo de partículas e variações da camada livre segundo Chen et al. ⁽³⁰⁾.

Utilizando partículas de diferentes tamanhos e variando a posição do homem morto em relação ao fundo observou-se que a região livre de partículas do fundo é um

atalho para o fluxo de líquidos. O líquido no núcleo de alta permeabilidade flui mais rápido do que em outra região. O líquido proveniente da região de baixa permeabilidade flui numa trajetória direcionada para a região de alta permeabilidade. De acordo com o estudo ⁽³⁰⁾ a criação de um chaminé acima da zona coesiva com o carregamento central de coque, pode ser gerar uma zona mais permeável no homem morto. Combinado com a presença de uma região livre de coque devido à operação com alta produtividade, um fluxo central intensificado de gusa causaria uma erosão acelerada dos refratários do fundo do cadinho.

Brännbacka et al. ⁽²⁴⁾ estudou modelo que considera o caso onde o coque do homem morto flutua no banho de gusa. Para o caso de um “homem morto” apoiado no fundo, ou “sentado” no jargão dos alto-fornistas, se pode estimar a evolução do nível de líquidos assim como valor do intervalo de escória, ou seja, o período em que apenas gusa flui na fase inicial da corrida. Para um caso mais complexo, com um homem morto parcialmente flutuante, equações foram apresentadas com o objetivo de ilustrar como um leito de coque em movimento afeta o nível de líquidos. Foi demonstrado que um “homem morto” flutuante é de considerável importância para o nível de líquidos e também para o intervalo de escória, que é uma variável que caracteriza o estado do homem morto.

Torrkulla et al. ⁽³⁵⁾ comenta que alguns os indicadores podem mostrar alterações fundamentais do estado do cadinho, tais como o assentamento ou flutuação do homem morto, além da permeabilidade. Citam que o intervalo de escória (atraso na saída de escória após o início de corrida) é uma variável que pode refletir o estado interno do cadinho, caso outras variáveis não tenham alteração significativa num período. Este atraso pode ser relacionado com a fração de vazios no homem morto mas também pode ser influenciado pela formação de cascão no interior do cadinho que reduz o volume disponível para acúmulo de líquidos.

Chen et al. ⁽³⁰⁾ também analisaram variáveis em modelo tri-dimensional como:

- heterogeneidade do leito no homem morto;
- posição do homem morto em relação ao fundo;
- posição do homem morto em relação ao furo de corrida;
- comprimento do furo.

De acordo com os estudos ⁽³⁰⁾, líquidos em posições distantes do furo de corrida podem encontrar um atalho em direções laterais através de camadas líquidas livres de partículas, imediatamente acima do fundo do recipiente do experimento. O fluxo

próximo da parede, especialmente próximo do furo de corrida, é fortemente influenciado pelo comprimento do furo, a posição de entrada em relação à parede no modelo físico. Na direção vertical, a trajetória do fluxo pode ser curvada devido à variação da permeabilidade dentro do homem morto. Os autores comentam que ⁽³⁰⁾:

- mantendo a taxa de vazamento baixa e o homem morto numa posição apoiada é um bom método para permitir o gusa fluir através do leito de coque ao invés de fazer trajetórias mais fáceis sobre a superfície do refratário; prática com múltiplos furos de corrida e um cadinho raso seriam benéficos para estes objetivos;
- a criação de uma chaminé acima da zona coesiva, com carregamento de coque central, pode também criar um núcleo mais permeável no homem morto;
- a presença de uma camada livre de coque no fundo, devido a operação com alta produtividade, com fluxo de gusa central intensificado causaria erosão acelerada nos refratários do fundo do cadinho.

Huang et al.⁽³⁶⁾ desenvolveram modelo tri-dimensional utilizando CFD em estudo da drenagem do cadinho para prever o nível de líquido e seu perfil dentro do alto forno baseado em dados de permeabilidade do cadinho e fluidez de escórias. Comentam que as diferenças nos níveis de líquidos (nível de escória e gusa) dependem da permeabilidade do cadinho, viscosidade da escória e taxa de vazamento. Quanto menor a permeabilidade do cadinho maior será a diferença no nível de líquidos.

Em estudos realizados por Nishioka et al. ^(6,9,10), é possível avaliar o efeito do diâmetro das partículas do leito de coque na espessura da camada de gusa e escória retida no cadinho. Sob várias condições internas do alto forno, estes pesquisadores estudaram o efeito sobre a drenagem, usando modelo físico e matemático, do diâmetro do coque, fração de vazios, altura da camada sem coque no fundo, altura da zona impermeável e distribuição do diâmetro do coque. Observaram 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 que o maior diâmetro do coque possibilitar melhor escoamento da escória. De acordo com estes pesquisadores ^(6,9,10):

- as condições da região periférica ao nível do furo de corrida determinam o volume residual de escória; o leito de coque na região até 2,0 m a partir do furo de corrida, que corresponde a apenas 4% do volume do cadinho, tem influência de aproximadamente 50% no volume residual de escória;

- o aumento do diâmetro do coque e fração de vazios, reduz a altura máxima da interface gás-escória;
- a variação da fração de vazios tem o maior efeito na altura da interface gás-escória;
- a distribuição do diâmetro de coque tem pequeno efeito na taxa total de drenagem, assim como, o diâmetro do coque num leito uniforme, o espaço livre de coque e zona impermeável abaixo do furo de corrida;
- as condições da região periférica do cadinho determinam os padrões de taxa de taxa de drenagem de gusa e escória;
- as condições do furo de corrida dominam a taxa total de drenagem em condições reais de operação do alto forno.
- as condições básicas foram: leito uniforme com diâmetro de coque de 30mm e fração de vazios de 0,30, propriedades do gusa e escória correspondentes a 1773 K, intervalo de corrida de 0 s . Os resultados das condições básicas foram validados com dados reais de operação do alto forno 6 de Chiba.
- comparando coque de 15 mm e 60 mm verifica-se pouca influência na taxa de escoamento total, mas com coque maior o gusa flui com taxa maior que a escória na primeira metade da corrida, ocorrendo o inverso, com maior fluxo de escória na segunda metade da corrida. Isto ocorre porque o aumento do coque causa aumento da força gravitacional e deste modo a interface gusa-escória tende a se manter na posição horizontal .

A redução do tamanho do coque causa uma expansão da camada interna de escória, com elevação da interface gás escória e abaixamento da interface escória-gusa conforme figura 15:

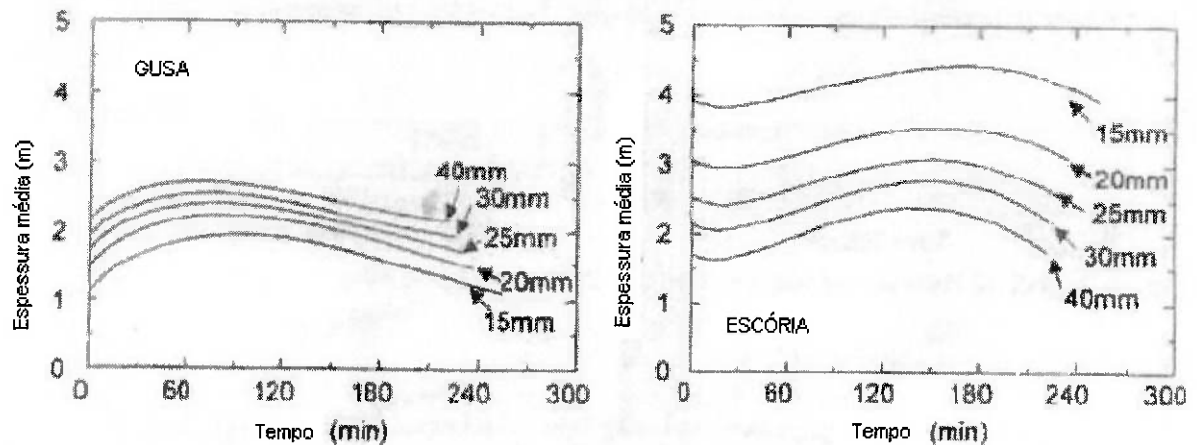


Figura 15 – Efeito do diâmetro do leito de partículas (coque) no nível médio da camada de gusa e escória segundo Nishioka et al ⁽⁶⁾ .

No caso do estudo houve um aumento de 2,4m na espessura da camada de escória. Uma redução do diâmetro de coque causa a redução de permeabilidade no homem morto, decréscimo de pressão interna no furo de corrida, redução de taxa de vazamento e como resultado um aumento do tempo de drenagem.

Um aumento da fração de vazios resulta em diminuição da espessura da camada de escória e da máxima altura da interface gás-escória. O efeito da fração de vazios é superior ao do tamanho de coque sobre a altura das interfaces, porque o aumento da fração de vazios no cadinho proporciona aumento da permeabilidade e da capacidade de estocagem de escória por volume de cadinho enquanto o aumento do diâmetro do coque proporciona apenas uma aumento da permeabilidade do cadinho. A espessura média da camada de escória diminuiu de 2,0 a 4,0 m e a altura máxima da interface gás-escória foi reduzida 3,0m com aumento da fração de vazios de 0,20 para 0,50. Sobre o efeito da camada sem coque no fundo do cadinho, Nishioka et al ^(6,9,10) relatam que a interface escória-gusa entra na camada sem coque quando esta tem 2,2m mas não foi observado efeito claro no comportamento da drenagem quanto a esta variável, exceto que a interface metal-escória permanece no mesmo nível durante quase toda a corrida. Quanto ao efeito da zona impermeável, os pesquisadores ^(9,10) fizeram estudos usando coque menor na periferia do cadinho e coque maior no centro e vice-versa. Verificaram que, com o aumento do diâmetro de coque na região periférica, a evolução da taxa de drenagem durante a corrida apresenta duas interseções nas taxas de drenagem de

gusa e escória que se movem em direção ao valor de início da corrida. Deste modo, a condição da região periférica determina o padrão de taxa de escoamento do gusa e escória embora não tenha efeito significativo na taxa total de escoamento. A presença de coque de maior diâmetro na periferia contribui para reduzir a altura da interface gás-escória e diminuir a espessura da camada de escória conforme ilustrado na figura 16:

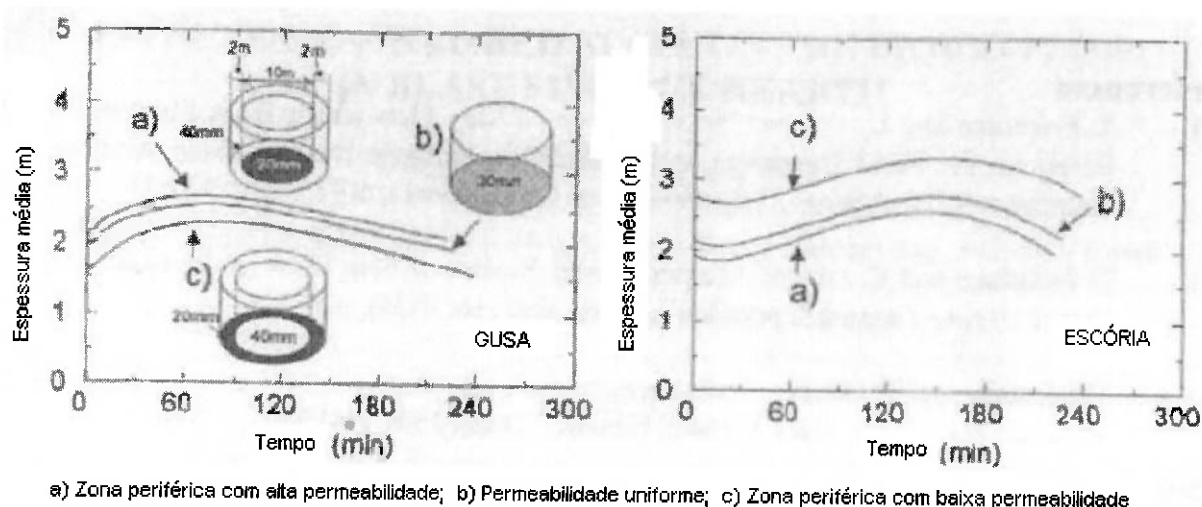


Figura 16 – Efeito da permeabilidade do leito de partículas (coque) no nível médio da camada de gusa e escória segundo Nishioka et al. ⁽⁶⁾.

O aumento do diâmetro do coque e fração de vazios reduz a altura máxima da interface gás-escória. Por outro lado, o aumento da viscosidade de escória aumenta a máxima altura da interface gás-escória. A razão é que a viscosidade da escória atua no fluxo de fluidos no cadinho como uma queda de pressão no leito de coque. Na expressão de Kozeny-Carman, a queda de pressão é proporcional à viscosidade e inversamente proporcional ao quadrado do diâmetro do coque e $\varepsilon/(1-\varepsilon)$. Assim, dobrando o diâmetro do coque contrabalança um aumento de quatro vezes na viscosidade da escória. A altura máxima da interface gás-escória reduz -se fortemente pelo aumento da fração de vazios.

De acordo com Elsaadawy et al. ⁽³⁴⁾, as características físicas (forma, localização, tamanho/porosidade da distribuição de partículas) da camada de coque porosa (homem morto) tem um papel crítico nos processos de transferência de fluxo e calor.

A camada de coque porosa numa situação dinâmica, na prática, vai sendo lentamente substituída pelo coque da parte superior e consumida no cadinho pelas reações químicas e pelo processo de dissolução pelo ferro líquido insaturado. Deve ser observado que o escoamento de gusa e escória líquidos no cadinho é um processo dinâmico (instável), por causa do fluxo contínuo de líquidos provenientes da zona de gotejamento e da operação de drenagem intermitente de gusa e escória. Ainda mais, num alto forno típico, o diâmetro de furo é de 50mm e o diâmetro de cadinho é de 8-14m, enquanto a velocidade do metal líquido varia de vários m/s (próximo ao furo) até a frações de cm/s (dentro da camada de coque). Elsadaawy et al.⁽³⁴⁾ citam que estudos anteriores de diversos pesquisadores mostraram que quando a camada de coque está parcialmente apoiada na posição central do fundo do cadinho forma-se um canal periférico, contornando a camada de coque e cercado pela parede inferior do cadinho, através do qual ocorre um fluxo intensivo de metal. Este fluxo intensivo cria altas tensões térmicas e mecânicas na parede inferior e periferia do fundo do cadinho que é conhecida como desgaste “como cogumelo” que leva a leva ao final prematuro da campanha do alto forno.

Desai et al.⁽³⁷⁾ registra que a presença de uma zona de menor permeabilidade no centro do leito de coque causa um aumento da velocidade periférica de líquidos de 39%, variando a porosidade de 1,0 para 0,5. Este fenômeno ajuda a explicar o maior desgaste para o furo de corrida que por sua vez irá afetar o nível de líquidos. De acordo com Chatterjee et al.⁽³⁸⁾, a ausência de camada sem coque no fundo (homem morto “sentado”) tem grande influência no abaixamento da temperatura do cadinho, Segundo Havelange et al.⁽³⁹⁾, a fração de vazios no cadinho varia significativamente e as variações são muito bem relacionadas com a qualidade do coque.

De todos os fatores estudados, a mais importante variável, em condições normais de operação de um alto forno, é o coque consumido que vai proporcionar as condições de permeabilidade no homem morto e cadinho do alto forno.

3.6.2 Ritmo de produção.

Nouchi et al.⁽¹²⁾ mostram em seu modelo que à medida que aumenta a produção, o nível máximo de parafina (equivalente à escória no alto forno) e a duração da corrida aumentam. Os efeitos do aumento de produção na taxa de HCFC (equivalente ao gusa no alto forno) e nível de líquidos são mostrados na figura 17 :

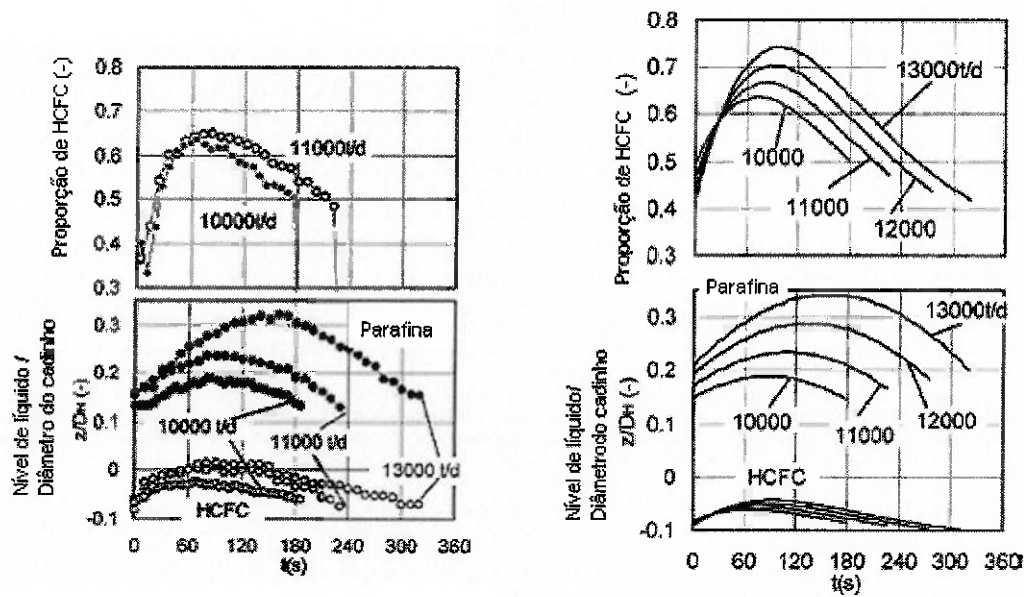


Figura 17 - Efeito do aumento da produção na proporção de HCFC e nível de líquido no cadinho, com o tempo, segundo Nouchi et al. ⁽¹²⁾ .

Na experiência realizada, aumenta-se a velocidade de suprimento de líquido para simular o aumento proporcional da produção. Observa-se que a produção mais alta causa um aumento do tempo para que a proporção de HCFC comece a reduzir. Este fenômeno é chamado de atraso de escória, ou seja, com aumento da produção o nível de líquidos sobe e dificulta a saída do líquido de menor densidade (escória). O diâmetro do furo de vazamento deve ser aumentado para reduzir a quantidade de escória residual em operação com alta produtividade.

Nouchi et al. ⁽¹²⁾ apresentam em seu estudo uma série de expressões para o modelamento matemático de sua experiência, conforme segue:

$$V_p + V_F = V_{total} \quad (21)$$

$$V_{total} = a_{corrida} t + V_{total0} \quad (22)$$

$$V_F/V_{total} = 1 + z_f/(k_f D_H) \quad (23)$$

$$\varepsilon S(1-Rlp)(dz_f/dt) = v_{f0} + v_f \quad (24)$$

$$\varepsilon S(1-Rlp)(dz_p/dt) = v_{p0} + v_{f0} - v_{total} \quad (25)$$

onde :

- v_p = velocidade volumétrica de drenagem da parafina
 v_f = velocidade volumétrica de drenagem de HCFC
 v_{p0} = velocidade volumétrica de suprimento (“produção”) da parafina
 v_{f0} = velocidade volumétrica de suprimento (“produção”) de HCFC
 v_{total0} = velocidade volumétrica de drenagem inicial total
 $a_{corrida}$ = coeficiente de aumento da velocidade volumétrica de drenagem total
 k_f = coeficiente arbitrário não-dimensional
 S = seção do cadinho
 R_{lp} = seção da ZBP (zona de baixa permeabilidade)

A inclinação média da superfície de parafina é considerada diretamente proporcional à velocidade de drenagem total de líquidos v_{total} , como mostrado antes (equação 14). Assim, os pesquisadores⁽¹²⁾ propõe que a diferença entre o nível de líquidos no centro e na parede, z_p e $z_{corrida}$ respectivamente, é dada pela equação:

$$z_p - z_{corrida} = (k_h D_H / 180) \text{sen} \theta = (k_h D_H) \frac{\mu}{\rho g d_p^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{v_{total}}{S} \quad (27)$$

onde k_h é um coeficiente arbitrário adimensional. Este conjunto de equações anteriores pode ser resolvido numericamente pelo método explícito. Adotando as constantes $K_f=0,17$ e $k_h=7,0$ para ajustar aos resultados experimentais, obtêm-se os efeitos da produção, abertura inicial (vazão) e zona de baixa permeabilidade na proporção de HCFC e nível de líquidos durante a corrida. Para o nível mínimo é máximo de escória o são propostas as seguintes expressões:

$$z_{p_{min}} = (k_h D_H) \frac{\mu}{\rho g d_p^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{2(v_p^0 + v_f^0) - v_{total}^0}{S} \quad (28)$$

$$z_{p_{max}} = z_{p_{min}} + \frac{(v_p^0 + v_f^0 - v_{total}^0)^2}{\varepsilon S (1 - R_{lp}) k_{corrida}} \quad (29)$$

Embora os fatores citados afetem o nível máximo de escória, os efeitos da produção e permeabilidade são especialmente fortes porque conforme equação (29) mostra, o nível máximo é diretamente proporcional ao quadrado da produção e inversamente proporcional à fração de vazios. Na figura 18 apresenta-se o gráfico da influência de produção e viscosidade da escória no nível máximo de escória:

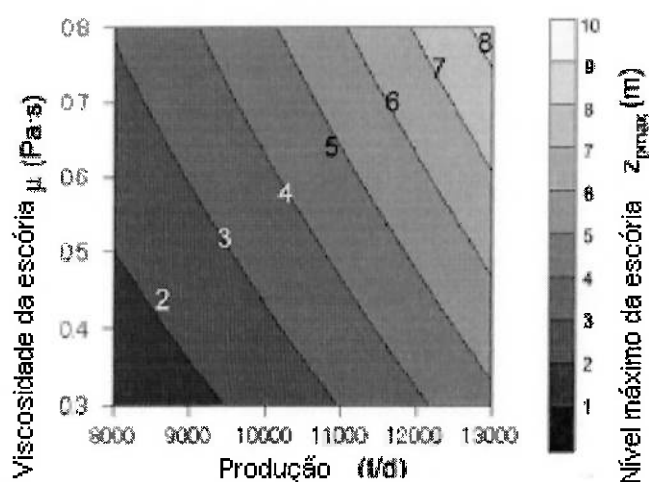


Figura 18 - Efeito da produção no máximo nível de escória segundo Nouchi et al ⁽¹²⁾.

Para um mesmo nível de viscosidade de escória, o aumento de produção implica em operação com nível de escória mais alto. Apenas 10% de aumento de produção (10.000 para 11.000 t/dia) corresponde a aumento de 1,0 m no nível de escória. Como a distância entre o furo de corrida e a ventaneira é fixa, a operação do alto forno tem que se preocupar com o aumento da pressão de sopro causada pelo maior nível de escória. Como mostrado na figura 18, o aumento de viscosidade da escória e aumento de produção, concomitante, tem efeito muito forte na elevação de nível de escória no cadinho devendo ser tomadas ações imediatas na operação do alto forno para evitar o fenômeno.

3.6.3 Viscosidade da escória.

De acordo com Fukutake e Okabe ⁽²⁾, a proporção residual de escória, α , aumenta com o aumento da viscosidade da escória. Os resultados experimentais são mostrados na figura 19:

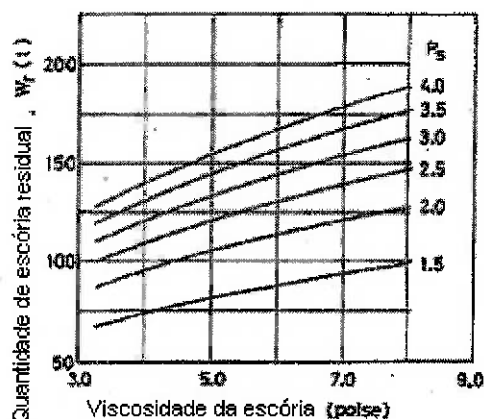


Figura 19 - Efeito da viscosidade da escória e taxa de vazamento na quantidade de escória residual segundo Fukutake e Okabe⁽²⁾.

Conforme citado anteriormente, neste estudo, os autores comentam que como a viscosidade do gusa é da ordem de 100 vezes inferior à da escória, a quantidade residual de gusa é considerada muito baixa comparada com a da escória.

Burgess et al.⁽³⁾ registram que um aumento na viscosidade da escória de 0,30 Pa.s para 0,50 Pa.s resultou em um aumento de 10% no residual de escória em condições de boa permeabilidade do cadinho. Em caso de aumento de partículas finas o mesmo aumento de viscosidade causa uma elevação de 50% no residual de escória.

Nouchi et al.⁽¹²⁾ define os níveis de escória mínimo (Z_{pmin}) e máximo (Z_{pmax}) em seu modelo conforme as equações (28) e (29) apresentadas no tópico anterior e reapresentadas abaixo:

$$Z_{pmin} = (k_h DH) \frac{\mu}{\rho g d_p^2} \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{2(v_p^0 + v_f^0) - v_{total}^0}{S} \quad (28)$$

$$Z_{pmax} = Z_{pmin} + \frac{(v_p^0 + v_f^0 - v_{total}^0)^2}{\epsilon S (1 - R_{lp}) k_{corrida}} \quad (29)$$

Pela expressão matemática fica claro que o aumento da viscosidade da escória terá influência no nível de líquido no cadinho. Nouchi et al.⁽¹²⁾ ilustra este efeito no gráfico da figura 20 mostrando a seguir:

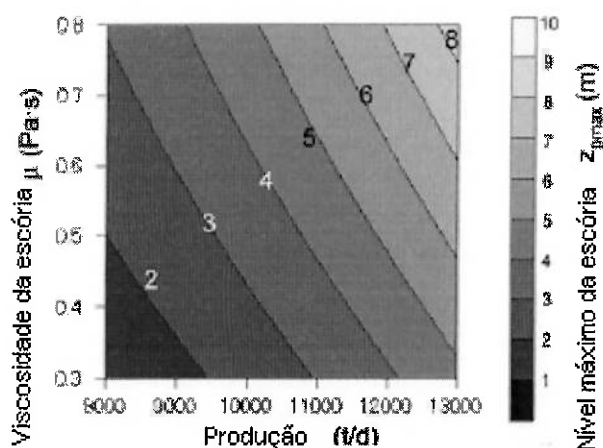


Figura 20 - Efeito da viscosidade e produção no máximo nível de escória segundo Nouchi et al ⁽¹²⁾.

Para um mesmo nível de produção, à medida que aumenta a viscosidade, aumenta o nível máximo de escória no cadinho. Conforme já citado, o nível máximo é diretamente proporcional ao quadrado da produção e inversamente proporcional à fração de vazios. Comparando com estes fatores, o efeito da redução da viscosidade da escória é pequeno. Embora a viscosidade tenha influência, os autores citam que a qualidade do coque é mais importante do que a qualidade do sinter e basicidade, relacionados à viscosidade da escória, para reduzir o nível de escória no cadinho em operação com alta produtividade.

Nishioka et al. ⁽⁶⁾ comentam que o aumento da viscosidade da escória aumenta a altura máxima da interface gás-escória. Nas condições adotadas em seu trabalho,, a fração de vazios e viscosidade da escória tem também pequeno efeito na taxa total de drenagem pois a máxima variação na taxa total de drenagem em relação à condição base não foi superior a 11% em todos os casos. Desde que a viscosidade da escória seja mantida em valores baixos como 0,27 Pa.s, a permeabilidade da região periférica pode ser estimada dos padrões de drenagem de gusa e escória desde que sejam obtidas medidas precisas de padrões de taxas de drenagem.

Nishioka et al ⁽¹⁰⁾ em outro estudo relatam que normalmente no alto forno a viscosidade da escória é mantida em valores baixos pelo controle de temperatura e composição. Um aumento de 4 vezes no valor da viscosidade causa uma elevação de 0,9 m na interface máxima de gás-escória e uma diminuição do nível da interface escória-gusa contribuindo para aumentar a espessura da camada de escória. O

tempo de corrida aumentou com a elevação da viscosidade da escória porque ocorreu redução de pressão no furo de corrida e no cadinho com uma redução da taxa total de escoamento. A posição da interface gás-escória depende do balanço entre força gravitacional e resistência ao fluxo da escória através da camada de coque. Um aumento de viscosidade causa aumento de resistência tendo como resultado o fluxo preferencial de gusa e um aumento da inclinação da interface gás-escória na direção do furo. A figura 21 apresenta o gráfico da influência da viscosidade da escória na espessura de camada de líquidos no cadinho:

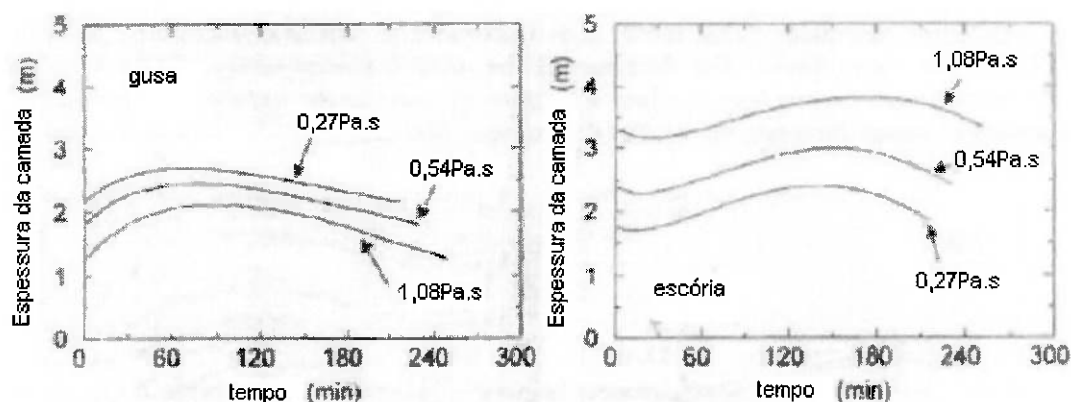


Figura 21 . Influência da viscosidade da escória na espessura da camada de gusa e escória no cadinho segundo Nishioka et al. ⁽¹⁰⁾ .

Comparando o efeito do coque com a viscosidade da escória, os autores ^(6,9,10) comentam que o aumento do diâmetro do coque e fração de vazios reduz a altura máxima da interface gás-escória. Por outro lado, o aumento da viscosidade de escória aumenta a máxima altura da interface gás-escória. A razão é que a viscosidade da escória contribui para o fluxo de fluidos no cadinho como uma queda de pressão no leito de coque. Na expressão de Kozeny-Carman a queda de pressão é proporcional à viscosidade e inversamente proporcional ao quadrado do diâmetro do coque e $\varepsilon/(1-\varepsilon)$. Assim , dobrando o diâmetro do coque contrabalança um aumento de quatro vezes na viscosidade da escória. A altura máxima da interface gás-escória reduz -se fortemente pelo aumento da fração de vazios.

Segundo Huang et al. ⁽³⁶⁾, num cadinho com múltiplos furos de corrida e drenagem contínua, uma camada mista de gusa e escória pode existir e, neste caso, a viscosidade da escória tem um efeito significativo na taxa de vazamento. O nível de líquidos ao final da corrida é inclinado do lado oposto ao furo de corrida em direção à

saída do furo. Quanto maior a viscosidade da escória, maior será a diferença no nível de líquidos (nível de escória) .

3.6.4 Comprimento de furo.

De acordo com Chen et al. ^(13,30) , em estudos com modelo físico, aumento do comprimento de furo, através da maior penetração do tubo de captação dentro do recipiente, causa o afastamento do fluxo de saída da parede como indicado pelas linhas de fluxo dos traçadores coloridos na figura 22:

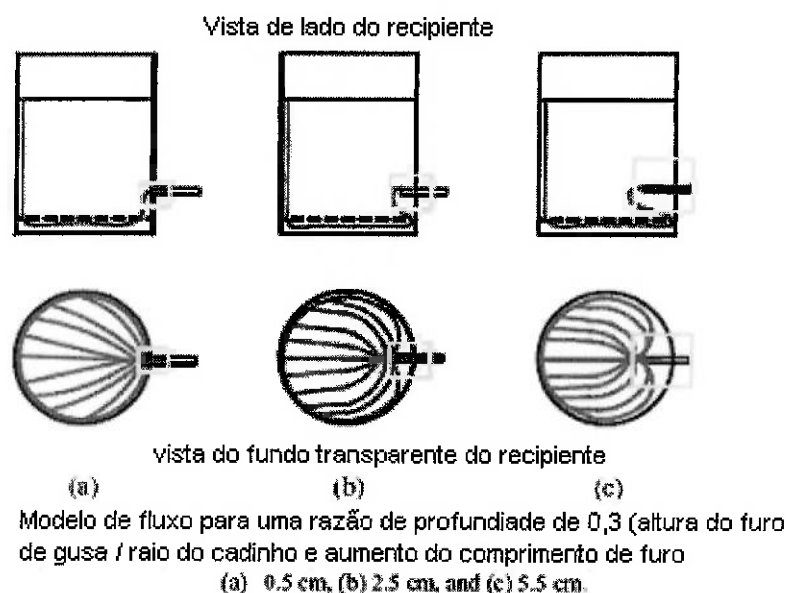


Figura 22 - Ilustração do efeito do comprimento de furo no modelo físico tridimensional do cadinho por Chen et al. ⁽¹³⁾ .

Na região do furo de corrida, a interação entre o gusa e a superfície de refratários se intensifica. Poderia ser moderada através do distanciamento da entrada do gusa no furo de corrida em relação à parede. Na prática do alto forno, isto poderia ser feito com um aumento do comprimento de furo através da manutenção de uma proteção interna de refratário, numa tamanho adequado, feita com a injeção periódica de massa de tamponamento em todo final de corrida. Esta proteção, também denominada de cogumelo, é essencial para a estabilidade do furo e da operação do alto forno. Nishioka et al. ^(6,10), conforme já relatado, comentam que as condições do

furo de corrida dominam a taxa total de drenagem em condições reais de operação do alto forno e desenvolveram um modelo matemático tri-dimensional considerando a conservação de momento para um fluxo de fluido (gusa, escória) em estado não estacionário. Para a estimativa da taxa de escoamento no furo de corrida, quando um furo de corrida é considerado um tubo, considerando o balanço de forças da força de cisalhamento na parede do furo de corrida e a diferença de pressão entre a entrada e saída do furo, a taxa de escoamento total de gusa e escória, u , é obtida das Equações (30) e (31):

$$u = \sqrt{\frac{\Delta P D}{2 f \rho L}} \quad (30)$$

$$f = \frac{0,0626}{\left[\log \left(\frac{e}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (31)$$

em que:

u = taxa total de drenagem de gusa e escória

P = pressão

D =diâmetro

f = fator de atrito

P = densidade

L = comprimento do furo,

e = rugosidade superficial

Re = número de Reynolds

Na prática operacional, como as condições do furo de corrida dominam a taxa de escoamento (u), assim, se a resistência ao fluxo é o fator dominante estes parâmetros (diâmetro do furo , comprimento de furo e rugosidade da superfície do furo) são determinantes no valor da taxa total de drenagem de um alto forno real.

Em seu trabalho, Nishioka et al. ⁽¹⁰⁾ , citam que a redução do comprimento de furo causa um aumento gradual da taxa de drenagem, especialmente para comprimento de furo da ordem de 2,0m. Entretanto, para comprimento de furo acima de 3,0m os autores perceberam um pequeno efeito na taxa de drenagem em função de variações no comprimento de furo.

3.6.5 Localização do furo de gusa no cadinho

Nishioka et al. ⁽¹⁰⁾ também investigaram o efeito do intervalo de corrida e localização do furo de gusa no alto forno 3 de Kobe (volume interno do alto forno é de 1845 m³, diâmetro de cadinho de 9,6m, distância entre o fundo e furo de corrida de 1,2m, dois furos de corrida, produção de 4150 t/dia e volume de escória de 227 kg/t de gusa). Gusa e escória foram vazados alternadamente de dois furos localizados com ângulo de 40° entre eles, até que o comportamento da drenagem atingisse o estado quase-estacionário. Com intervalo de corrida de zero minutos a escória drena primeiro pois o nível médio do gusa está abaixo do furo de corrida. Com o aumento do intervalo de corrida, o nível médio de gusa aumenta e verifica-se que o padrão de drenagem, se no início de corrida o gusa sai primeiro ou não, é bastante influenciado pelo intervalo de corrida. Em termos do formato das interfaces gás-escória e gusa-escória, observa-se que para operação com intervalo de 1620s (27minutos), após 8 minutos do fechamento do furo, ou seja 8 minutos de intervalo de corrida, as interfaces estão planas. Deste modo, um intervalo de corrida superior a 8 minutos elimina o efeito da localização do furos de corrida.

De acordo com Chen et al. ⁽³⁰⁾, de seu modelo tri-dimensional, Nnanna observou que a relação entre a distância do furo até o fundo do cadinho e o raio deste (razão de profundidade), e a porosidade do homem morto, afetam o modelo de fluxo dentro da camada de coque. Para uma maior razão de profundidade (maior altura do furo em relação ao fundo do cadinho), a quantidade de fluxo de líquidos refletida pela superfície do fundo do cadinho diminui.

Pereira ⁽⁵⁾ em experiências com modelo físico verificou que a posição do furo de corrida exerce influência no residual de escória e mostra que a melhor posição entre dois furos, para minimizar o residual de escória, é com ângulo de 180° entre eles.

3.6.6 Diâmetro do furo de corrida .

Segundo Nouchi et al ⁽¹²⁾, em seus experimentos em modelo físico, à medida que aumenta a produção, o nível máximo de parafina ("escória") e a duração da corrida aumenta. O diâmetro do furo de vazamento é aumentado para reduzir a quantidade de escória residual em operação com alta produtividade. A figura 23 mostra que no caso de simulação no modelo, para a operação com 13.000 t/dia, à medida que

aumenta a abertura da válvula de controle de fluxo, de 65% a 80%, para a mesma velocidade de saída, o nível máximo de parafina e a duração da corrida diminuem. Este resultado prova que a ação operacional é apropriada para reduzir o nível de líquido no cadinho.

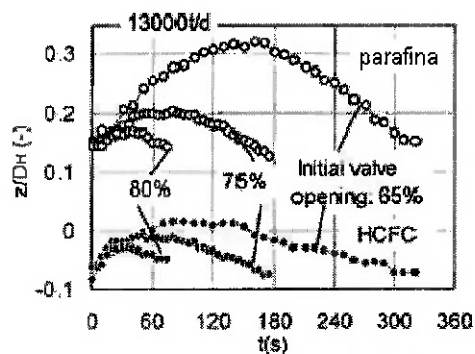
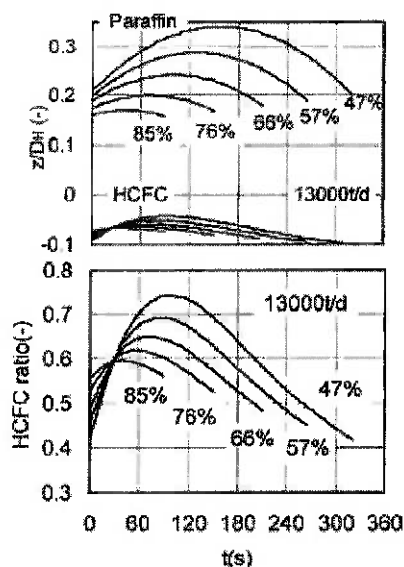


Figura 23 - Efeito da abertura inicial sobre o nível de líquidos por Nouchi et al (12).

O aumento da taxa de drenagem, ou seja aumento de v_{total}^0 , vai proporcionar uma redução do nível de líquidos conforme já mostrado na figura 23 e também na figura 24:



% = razão da velocidade de vazamento em relação à velocidade de suprimento

Figura 24 - Efeito da velocidade inicial de drenagem na proporção de HCFC e nível de líquidos segundo Nouchi et al (12).

Os efeitos, na duração da corrida e máximo nível de escória Z_{pmax} , da estratégia de drenagem em termos de diâmetro de abertura do furo (v_{total}^0) e qualidade da massa de tamponamento (fechamento do furo ao final de cada corrida), são mostrados na figura 25 e figura 26.

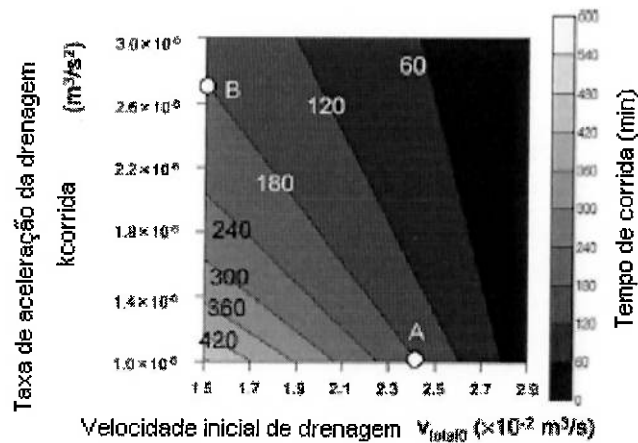


Figura 25 - Efeito da velocidade inicial de drenagem e taxa de aceleração de drenagem no tempo de corrida segundo Nouchi et al ⁽¹²⁾.

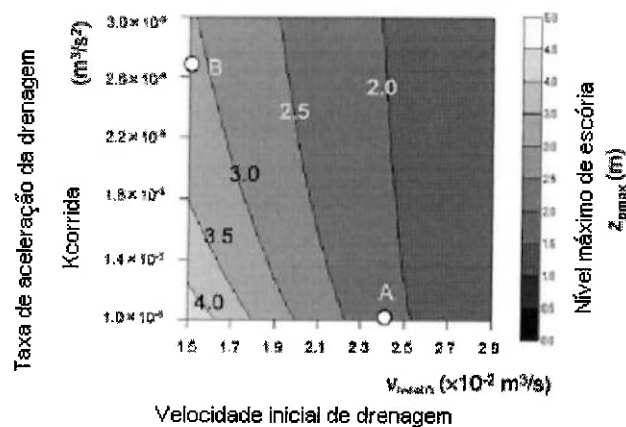


Figura 26 - Efeito da velocidade inicial de drenagem (diâmetro inicial do furo) e taxa de aceleração da drenagem no nível de escória segundo Nouchi et al ⁽¹²⁾

Nos gráficos anteriores a qualidade da massa refratária é relacionada com a taxa de aceleração de desgaste (maior taxa indicando produto com menor resistência ao

desgaste pela ação do gusa e escória líquidos). De maneira geral, corrida de longa duração significa alto nível de escória. Na mesma condição de duração da corrida (por exemplo, ponto A e B na figura 26), maior diâmetro de furo e melhor massa refratária de tamponamento (ponto A) podem reduzir o nível máximo de escória pois este decresce na proporção do quadrado da velocidade inicial de drenagem.

Como mostrado na figura 26, a duração da corrida aumenta com a redução do diâmetro inicial de abertura do furo para uma mesma qualidade da massa refratária. Embora corrida de longa duração seja preferível pelos operadores, eles tem que considerar um aumento do nível de escória no cadinho. Para condição de elevado nível de escória no cadinho, o uso de grande diâmetro de abertura do furo reduz o nível de escória significativamente. Alguns operadores tem receio de que grande diâmetro de furo inicial aumente o diâmetro final do furo e cause dificuldade de fechamento do mesmo com segurança. Mas se a aceleração do volume de drenagem é constante, grande diâmetro inicial de furo significa menores diâmetro final e velocidade final de drenagem. Por outro lado, Huang et al. ⁽³⁶⁾ comentam que quanto maior a taxa de vazamento, maior será a diferença no nível de líquidos, ou seja, aumentará o nível de escória residual. Nishioka et al. ⁽¹⁰⁾ mostram em seu modelo que o diâmetro do furo tem influência no nível de líquidos pois a velocidade de drenagem depende diretamente do diâmetro do furo conforme as equações (30) e (31). Zhao et al. ⁽⁴⁰⁾ comentam que, em seu estudo, aparentemente o aumento do diâmetro do furo causa aumento de volume de escória residual, fato que contraria o resultado verificado em outros trabalhos. Entretanto na prática, o aumento excessivo do diâmetro de furo, por desgaste do refratário, gera sopro rápido do furo de corrida e aumento do residual de escória.

4 ESTIMATIVA DO NÍVEL DE ESCÓRIA NO CADINHO DO ALTO FORNO 2 DA COSIPA E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS OPERACIONAIS.

Neste tópico será efetuado o cálculo estimativo da altura da camada de escória no alto forno 2 da COSIPA usando dados industriais de corridas do ano de 2005 e uma análise da evolução de variáveis de drenagem na atual campanha. Conforme será mostrado, em 2005 houve alterações na operação do alto forno com redução ritmo de produção, com efeitos em variáveis diversas, em consequência de diminuição de demanda no mercado de aço. Tais alterações proporcionaram um

campo de estudo para verificar a possível influência de determinadas variáveis em resultados de drenagem do alto forno.

4.1 Dados gerais do alto forno 2 da COSIPA

As características do alto forno 2 são apresentadas na tabela 2. A capacidade de produção é de 8500 t/dia mas de acordo com disponibilidade de oxigênio puro este valor pode subir já tendo alcançado o recorde de 9524 t/dia. A cada reforma do equipamento, normalmente realizada por desgaste do cadinho após 10 a 15 anos de operação, inserem-se novas tecnologias de materiais, dispositivos mecânicos, elétricos e elementos de refrigeração visando aumentar o período da próxima campanha. O escoamento do gusa e escória produzidos é realizado por três furos de gusa e suas respectivas casas de corrida com os canais de corrida, conforme ilustrado na figura 27 onde se mostra um croqui ilustrativo da planta das casas de corrida.

	Unit	ALTO FORNO 2
Blown in	data	11/22/2001
Volume útil	m ³	3365
Volume de trabalho	m	2865
Diâmetro do cadinho	m	12,4
Diâmetro do ventre	m	14,4
Diâmetro da goela	m	8,9
Altura do cadinho	m	4,14
Altura da rampa	m	4
Altura do ventre	m	1,8
Altura da cuba	m	16,5
Altura da goela	m	2,3
2. Equipamento do topo		
Sistema de carregamento	tipo	correla transportadora-duplo cone
Pressão do topo	kg/cm ²	1,90 - 2,50
3. Equipamentos da limpeza de		
Geração do Pó de coletor	kg/t	17,23
Lavador de gás	tipo	Venturi (2)
Pressão na saída do venturi	kg/cm ²	0,085
4. Sistema de injeção de carvão pulverizado - PCI		
Projeto	tipo	NSC
Capacidade de injeção	t/h	45,0 - 59,6
5. Regeneradores		
Tipo de camara	tipo	interna
Numero de regeneradores	Unit	4
Tipo de combustível		COG e BFG
Área de troca de calor	m ²	60000
Temperatura de sopro	°C	1180
8. Casas de corrida		
Número de furos de gusa	nº	3
Numero de ventaneiras	nº	33
Diâmetro das ventaneiras	mm	155/145/135
Distância Ventaneiras - Furo de Gusa	mm	4739
Distância Furo de Gusa - Soleira	mm	2461
Ângulo de inclinação dos FGs	º	14
Ângulo de inclinação das ventaneiras	º	5º e 9º
Diâmetro dos FGs	mm	50
Campanha dos Canais de Corrida	dias	28
Tipo de Perfurador (hidráulico ou pneumático)	tipo	P/H
STAVES	tipo	399
Distância Ventaneiras - Furo de Gusa (carbono)	mm	4739
Distância Ventaneiras - Furo de Gusa (3300mm)	mm	5593
Distância Furo de Gusa - Soleira	mm	1607

Tabela 2 – Características gerais do alto forno 2 da COSIPA.

PLANTA DE CASAS DE CORRIDA - ALTO FORNO 2

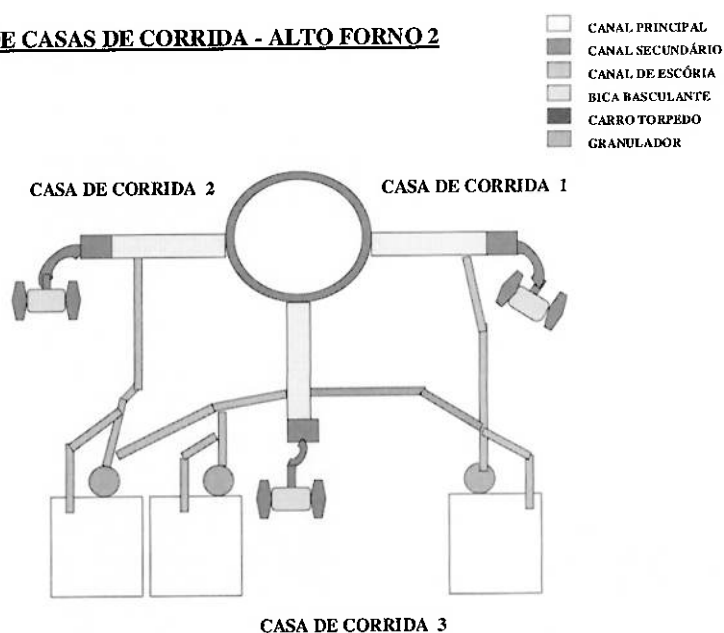


Figura 27 - Ilustração da planta do cadinho com as três casas de corrida do Alto forno 2 da COSIPA.

4.2 Dados utilizados no estudo e evolução das variáveis operacionais do alto forno 2

Este estudo utilizou dados de corridas do alto forno 2 para estimar o nível de escória e analisar a influência de fatores operacionais sobre a drenagem do cadinho.

Os dados utilizados em cada corrida são ilustrados na tabela 3:

Data	Corrida	Comprimento de Furo (mm)	Corrida	Furo	Intervalo de corrida (min)	Intervalo de escória (min)	TSI	Tempo de corrida (min)	Gusa Produzido	Temperatura do Gusa (°C)	Diâmetro do furo (mm)
01/01/05	9593	3100	9593	1	-9	5	0,98	189	1054	1556	50
01/01/05	9594	3000	9594	2	-6	4	0,99	173	915	1555	50
01/01/05	9595	3100	9595	1	1	10	0,94	143	787	1556	50
01/01/05	9596	3000	9596	2	0	13	0,92	173	956	1528	50
01/01/05	9597	3000	9597	1	0	2	0,99	158	856	1516	50
01/01/05	9598	3100	9598	2	0	2	0,98	128	707	1510	50
01/01/05	9599	3000	9599	1	3	15	0,92	156	884	1487	60
01/01/05	9600	3000	9600	2	1	26	0,79	118	581	1484	60
02/01/05	9601	3000	9601	1	-5	4	0,94	162	813	1487	60
02/01/05	9602	3000	9602	2	-24	19	0,96	126	633	1481	60
02/01/05	9603	3100	9603	1	-2	2	1,00	183	979	1478	50
02/01/05	9604	3200	9604	2	-12	9	0,98	140	751	1503	60
02/01/05	9605	3100	9605	1	5	11	0,97	180	978	1487	50
02/01/05	9606	3300	9606	2	-12	9	0,98	149	765	1496	50
02/01/05	9607	2900	9607	1	2	7	0,97	186	975	1485	50
02/01/05	9608	2800	9608	2	-1	2	0,98	141	705	1509	50

Tabela 3 – Dados de corridas do alto forno 2 em 2005.

Nesta tabela, e nas demais, ilustra-se uma parcela das 2620 corridas utilizadas no estudo. Na tabela 4 apresentam-se os dados da composição da escória também para parte das corridas:

Data	Corrida	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%S	%MnO	%TiO ₂	%FeO	Volume de escória kg/t gusa
01/01/05	9593	32,37	12,58	42,56	6,90	1,38	0,41	0,40	0,88	257
01/01/05	9594	34,29	12,31	42,25	6,95	1,18	0,63	0,48	0,31	257
01/01/05	9595	33,83	12,60	42,82	6,93	1,37	0,45	0,40	0,19	257
01/01/05	9596	34,27	12,31	42,52	6,83	1,27	0,57	0,45	0,13	257
01/01/05	9597	33,22	11,85	42,32	6,70	1,19	1,98	0,51	0,2	257
01/01/05	9598	33,04	11,28	40,37	6,34	1,11	4,93	0,64	0,3	257
01/01/05	9599	32,85	11,22	40,33	6,31	1,10	4,95	0,63	0,29	257
01/01/05	9600	33,55	11,48	41,70	6,58	1,18	1,03	0,56	0,16	257
02/01/05	9601	33,67	11,53	41,70	6,57	1,18	1,03	0,55	0,15	252
02/01/05	9602	34,42	12,15	41,70	6,64	1,17	0,99	0,56	0,29	252
02/01/05	9603	34,43	12,48	41,72	6,66	1,14	0,93	0,51	0,2	252
02/01/05	9604	34,92	12,11	41,56	6,69	1,15	0,94	0,56	0,37	252
02/01/05	9605	34,38	12,02	42,10	6,63	1,17	0,79	0,47	0,21	252
02/01/05	9606	34,20	12,06	42,18	6,63	1,20	0,80	0,47	0,2	252
02/01/05	9607	34,13	12,20	42,09	6,66	1,25	0,70	0,47	0,17	252
02/01/05	9608	33,42	12,28	42,07	6,69	1,23	0,81	0,50	0,18	252
02/01/05	9609	32,56	12,46	42,44	6,73	1,26	0,74	0,43	0,18	252

Tabela 4 – Dados de escória das corridas do alto forno 2 em 2005.

Na tabela 5 são mostrados dados operacionais relativos a cada corrida e que foram também utilizados nos estudos:

Data	Corrida	Vazão de ar + oxigênio Nm ³ /min	pressão de base KPa	pressão de topo KPa	Fluxo térmico na soleira	DI do coque	CRI do coque	CSR do coque	Tamanho médio do coque
01/01/05	9594	5361	320	178	1815	82,8	24,7	65,3	53,4
01/01/05	9595	5333	320	178	1815	82,8	24,7	65,3	53,4
01/01/05	9596	5316	320	178	1815	82,8	24,7	65,3	53,4
01/01/05	9597	5299	320	178	1815	82,8	24,7	65,3	53,4
01/01/05	9598	5272	319	178	1815	82,8	24,7	65,3	53,4
01/01/05	9599	5272	319	178	1815	82,8	24,7	65,3	53,4
01/01/05	9600	5297	321	177	1815	82,8	24,7	65,3	53,4
02/01/05	9601	5310	321	178	1817	82,4	25,4	65,3	51,6
02/01/05	9602	5318	322	178	1817	82,4	25,4	65,3	51,6
02/01/05	9603	5325	323	178	1817	82,4	25,4	65,3	51,6
02/01/05	9604	5332	324	178	1817	82,4	25,4	65,3	51,6
02/01/05	9605	5332	324	178	1817	82,4	25,4	65,3	51,6
02/01/05	9606	5353	325	178	1817	82,4	25,4	65,3	51,6
02/01/05	9607	5366	326	178	1817	82,4	25,4	65,3	51,6
02/01/05	9608	5366	326	178	1817	82,4	25,4	65,3	51,6
02/01/05	9609	5410	327	178	1817	82,4	25,4	65,3	51,6

Tabela 5 – Dados operacionais do alto forno 2 relativos às corridas de 2005.

A evolução do ritmo de produção do alto forno 2, com base na vazão de ar soprado e oxigênio é mostrada na figura 28:

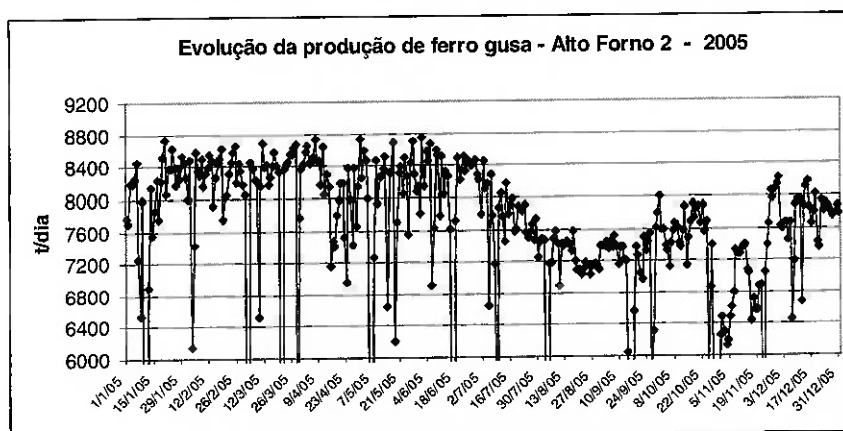


Figura 28 – Evolução da produção de gusa do alto forno 2 da COSIPA em 2005.

Verifica-se conforme já comentado que houve redução do ritmo a partir de junho/05 devido a retração do mercado siderúrgico.

Outro aspecto interessante que teve grande variação neste ano foi a evolução do fluxo térmico no fundo cadinho conforme mostrado na figura 29:

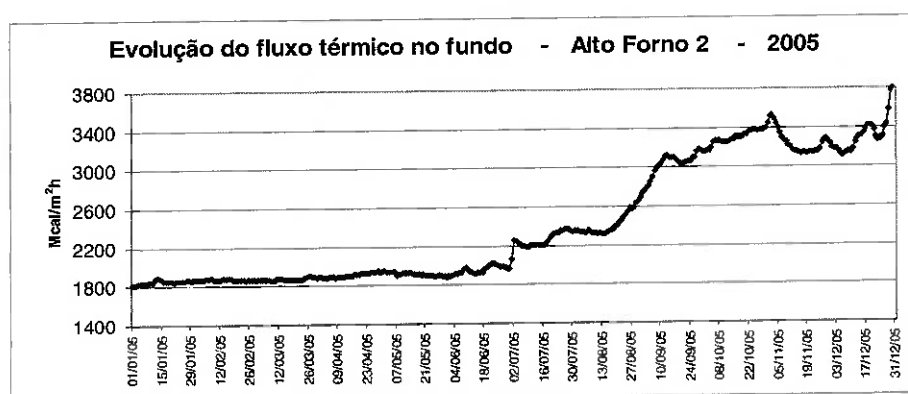


Figura 29 – Evolução do fluxo térmico no fundo do cadinho do alto forno 2 da COSIPA em 2005.

Tal comportamento tem relação com a formação de cascão no fundo do cadinho e também é indicativo de menos circulação de líquidos nesta região. Este fenômeno tem relação com o posicionamento do homem morto, sentado no fundo do cadinho, que causa a redução de fluxo pelo fundo conforme ilustrado nas experiências de Chen ⁽⁴⁶⁾. A oscilação de produção e fluxo térmico mostrou, na prática, influência no

comportamento da drenagem do cadinho quanto ao valores de comprimento de furo, de tempo de corrida e frequência de corridas/dia. Como pode ser mostrado no gráfico da figura 30, no decorrer do ano de 2005 verificou uma elevação no comprimento de furo de gusa, usando os mesmos produtos refratários no período.

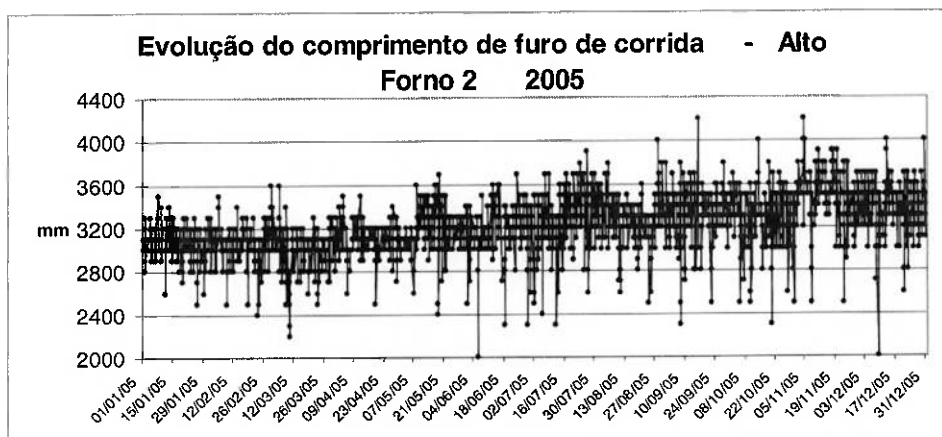


Figura 30 – Evolução do comprimento de furo de gusa do alto forno 2 da COSIPA em 2005.

Como foram obtidas melhores condições para o escoamento de líquidos, pelo aumento do comprimento de furo e elevação da temperatura do fundo do cadinho, com aumento do fluxo térmico, verificou-se melhoria no tempo de corrida conforme mostra-se no gráfico da figura 31:

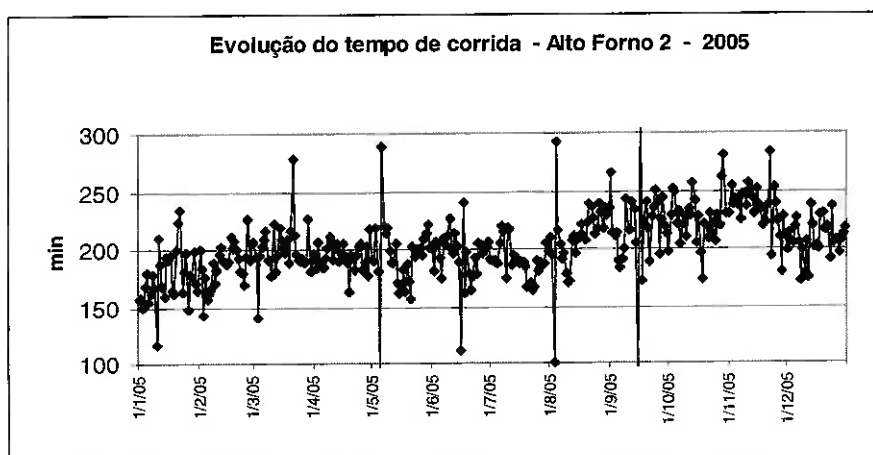


Figura 31 – Evolução do tempo de corrida do alto forno 2 da COSIPA em 2005.

Em consequência destes fatores, a frequência de corridas teve redução de acordo com o gráfico apresentado na figura 32:

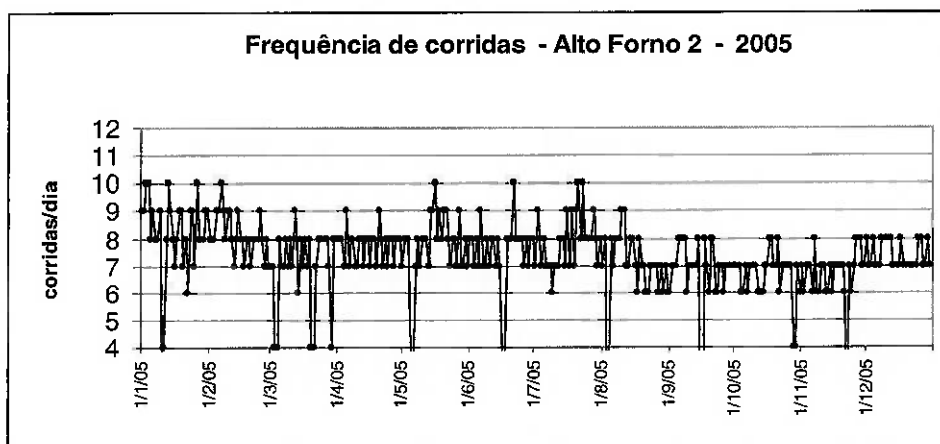


Figura 32 – Evolução do tempo de corrida do alto forno 2 da COSIPA em 2005.

A evolução dos dados apresentados anteriormente, juntamente com dados de cada corrida do alto forno, foram usados para os estudos seguintes.

4.3 Estimativa do nível de escória máximo

Em condições normais de operação, o nível de escória atinge o valor máximo entre fechamento do furo de gusa e o início da corrida de escória da próxima abertura de furo. Com os dados das corridas de 2005 efetuou-se o cálculo com base nas seguintes premissas adotadas por diversos autores ^(2,10,12,15) :

- fração de vazios no cadinho = 0,30;
- o volume do cadinho está normalmente com 50% dos vazios ocupados por escória residual;
- Os cálculos são efetuados pelo balanço de massa e volumétrico de acúmulo de líquidos no cadinho para cada corrida considerando os intervalos de escória (atraso de escória – período em que apenas gusa flui na corrida).

A tabela 6 mostra o resultado do cálculo para algumas corridas.

O gráfico da figura 33 mostra a evolução do nível de escória máximo no ano de 2005:

Data	Corrida	Atraso de escória (min)	TSI	Tempo de corrida (min)	Gusa Produzido (t de gusa)	Peso de escória (kg/t de gusa)	Taxa de produção		Escória acumulada m ³	Nível máximo da escória m
							gusa m ³ /min	escória m ³ /min		
1/1/2005	9593	5	0,98	189	1054	257	0,832	0,574	2,868	2,45
1/1/2005	9594	4	0,99	173	915	257	0,789	0,544	2,176	2,43
1/1/2005	9595	10	0,94	143	787	257	0,821	0,566	5,660	2,53
1/1/2005	9596	13	0,92	173	956	257	0,825	0,568	7,388	2,57
1/1/2005	9597	2	0,99	158	856	257	0,809	0,557	1,114	2,40
1/1/2005	9598	2	0,98	128	707	257	0,824	0,568	1,136	2,40
1/1/2005	9599	15	0,92	156	884	257	0,846	0,583	8,741	2,61
1/1/2005	9600	26	0,79	118	581	257	0,735	0,506	13,165	2,73
2/1/2005	9601	4	0,94	162	813	252	0,749	0,505	2,022	2,43
2/1/2005	9602	19	0,96	126	633	252	0,750	0,506	9,614	2,63
2/1/2005	9603	2	1,00	183	979	252	0,798	0,539	1,078	2,40
2/1/2005	9604	9	0,98	140	751	252	0,801	0,540	4,863	2,50
2/1/2005	9605	11	0,97	180	978	252	0,811	0,547	6,020	2,54

Tabela 6 – Resultado do nível máximo de escória para algumas das corridas.

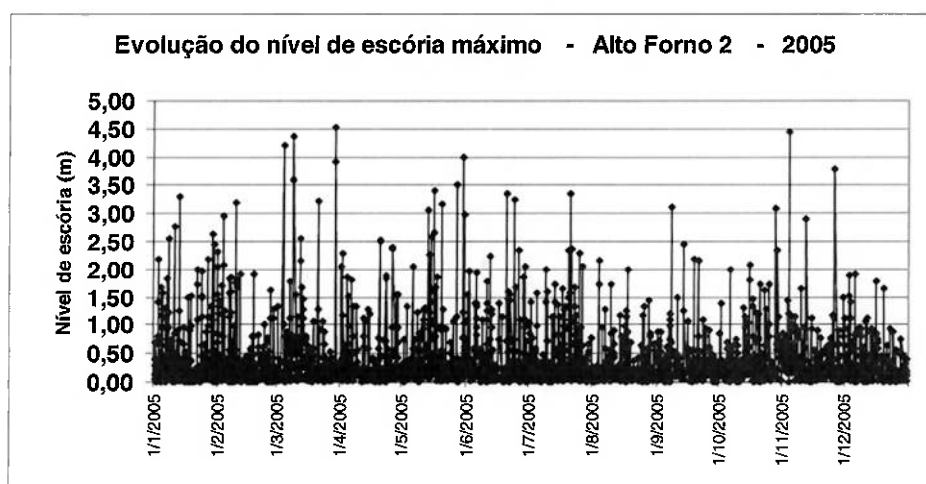


Figura 33 – Evolução do nível de escória máximo no alto forno 2 da COSIPA em 2005.

Estes dados foram submetidos a análises gráficas na tentativa de obter correlações entre variáveis operacionais. Nas figuras 34, 35, 36 e 37 são apresentados alguns dos gráficos.

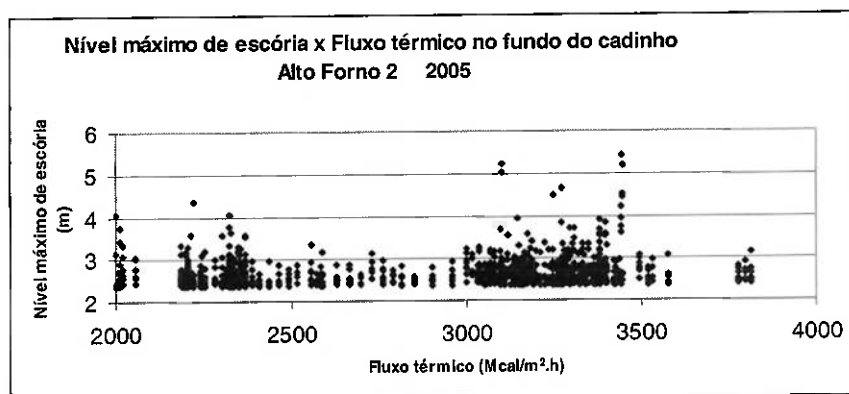


Figura 34 –Nível de escória máximo e fluxo térmico - alto forno 2 da COSIPA em 2005.

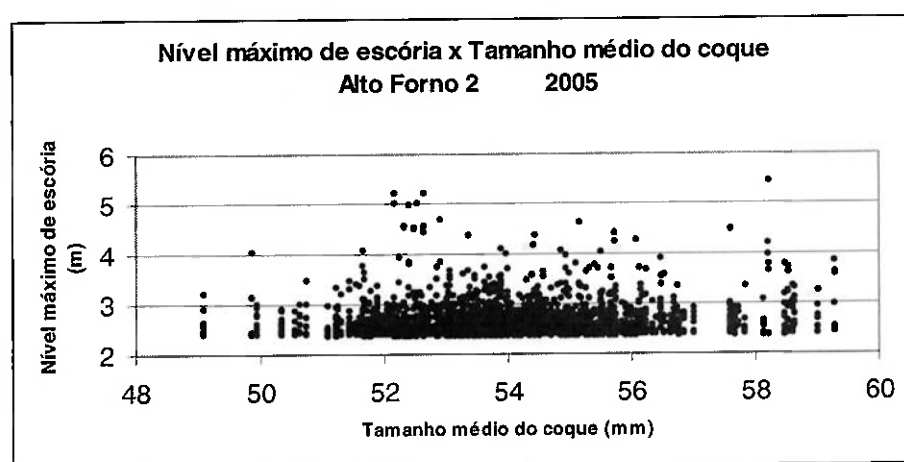


Figura 35 –Nível de escória máximo e tamanho médio do coque no alto forno 2 da COSIPA em 2005.

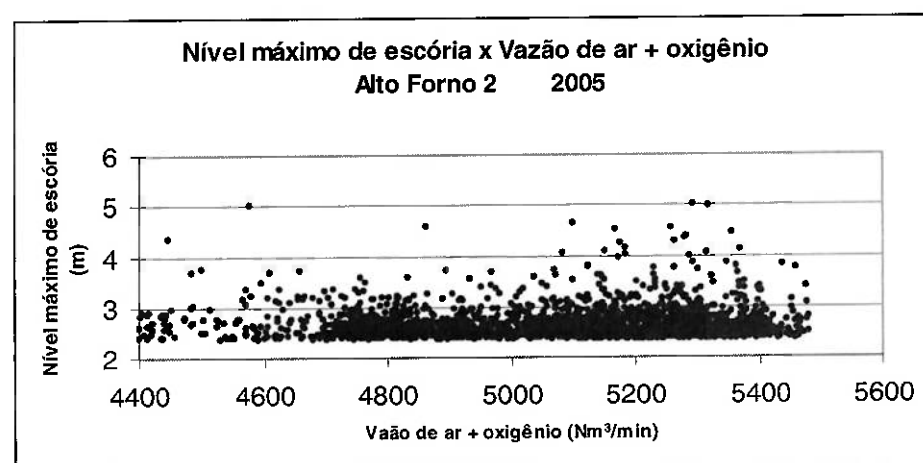


Figura 36 – Relação entre o nível de escória máximo e vazão de ar soprado e oxigênio (ritmo de produção) no alto forno 2 da COSIPA em 2005.

Conforme se observa nos gráficos anteriores, não foram encontradas relações de influência entre estas variáveis e o nível máximo de escória. Diversas condições de restrição foram efetuadas para tentar obter alguma relação gráfica mais clara, tais como:

- análise de corridas com o mesmo diâmetro de furo inicial de 50 mm, que é o diâmetro de broca usado em 97% das corridas do ano;
 - análise de corridas com a mesma faixa de produção;
 - análise de corridas com mesmo intervalo de abertura;
 - análise de corridas com a mesma faixa de comprimento de furo.
- Em nenhum caso foi obtida uma relação de causa e efeito nítida.

4.4 Estimativa do nível de escória pelas equações da fluidodinâmica

No cálculo da espessura média da camada de escória considerou-se a velocidade de corrida do gusa e escória através de cálculo usando a equação de Bernoulli e equação de Darcy-Weisbach, conforme estudos anteriores já apresentados por Mitsui ⁽⁴¹⁾ e Nishioka ^(9,10) :

$$\Delta P = P + \rho gh - 1/2 \rho v^2 \quad (32)$$

$$\Delta P = \lambda \rho \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \quad (33)$$

onde:

ΔP : queda de pressão no furo de corrida.

P : pressão interna no alto forno.

h : nível de líquido a partir do nível da saída do furo de gusa.

ρ : densidade média do fluido

l : comprimento de furo de corrida

d : diâmetro médio do furo de corrida

v : velocidade média de vazamento

g : aceleração da gravidade.

λ : fator de atrito do furo de corrida.

A velocidade média de vazamento é expressa pela equação:

$$v^2 = \frac{2 (P/\rho + gh)}{1 + \frac{\lambda L}{d}} \quad (34)$$

Desta equação obtém-se o valor de h:

$$h = \left[\frac{v^2}{2} \left(1 + \frac{\lambda L}{d} \right) - P/\rho \right] \cdot \frac{1}{g} \quad (35)$$

Premissas utilizadas:

- o valor de λ (fator de atrito) foi calculado usando a expressão (30) proposta por Nishioka et al. ⁽⁹⁾ e a rugosidade do furo de corrida $e=13$ mm .
- foi considerado uma taxa linear de desgaste do refratário do furo de corrida como 0,102 mm/min baseado em medições efetuadas por Nishioka et al ⁽⁹⁾ para efeito de determinação do diâmetro médio do furo na corrida.
- Para cálculo da viscosidade da escória foi usada a expressão matemática proposta por Fontana et al, apud Tavares ⁽¹⁾ e mostrada abaixo:

$$\ln \mu = -10,347 + \frac{25144}{T} - 9,633 \frac{\%CaO}{100} - 11,818 \frac{\%MgO}{100} - 0,8022 \frac{\%Al_2O_3}{100}$$

Sendo que $\%CaO + \%MgO + \%Al_2O_3 + \%SiO_2 = 100$

Os dados encontrados para a viscosidade estão dentro de faixa de valores obtidas por Nakamoto et al. ⁽⁴²⁾ .

- A viscosidade do gusa foi considerada 0,006 Pa.s de acordo com valor adotado por Nouchi et al ⁽¹²⁾ .

Os cálculos foram efetuados para as corridas disponíveis e um exemplo do resultados obtidos em termos de altura da camada de escória é mostrado na tabela

Data	Corrida	Furo	Diâmetro do furo		Vazão de líquidos		v	pg	pesc	pm	pesc	μm	Re _m	f	PB	g	V ² / 2 × (1 + f / D)	PB / p	Altura da escória m
			Inicial	médio	m3/min	m3/s													
		(mm)	(mm)			m/s	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	Pa.s	Pa.s			KPa	m/s ²				
1/1/2005	9593	3000	50	57,2	1,344	0,022	8,7	6700	2600	5142	0,131	0,055	47,014	0,043	320,753	9,8	125,9	62,4	6,5
1/1/2005	9594	3000	50	56,4	1,275	0,021	8,5	6700	2600	5142	0,146	0,061	40,747	0,043	320,001	9,8	119,5	62,2	5,8
1/1/2005	9595	3100	50	54,8	1,327	0,022	9,4	6700	2600	5142	0,140	0,058	45,443	0,044	319,997	9,8	153,2	62,2	9,3
1/1/2005	9596	3000	50	56,4	1,332	0,022	8,9	6700	2600	5142	0,179	0,073	35,211	0,043	319,645	9,8	130,5	62,2	7,0
1/1/2005	9597	3300	50	55,6	1,306	0,022	9,0	6700	2600	5142	0,184	0,075	33,943	0,044	319,611	9,8	134,9	62,2	7,4
1/1/2005	9598	3100	50	54,1	1,332	0,022	9,7	6700	2600	5142	0,210	0,085	31,508	0,045	319,155	9,8	166,6	62,1	10,7
1/1/2005	9599	3000	60	65,5	1,366	0,023	6,8	6700	2600	5142	0,250	0,101	22,553	0,039	319,155	9,8	63,7	62,1	0,2
1/1/2005	9600	3200	60	63,5	1,187	0,020	6,2	6700	2600	5142	0,248	0,100	20,371	0,040	320,575	9,8	56,2	62,3	-0,6
2/1/2005	9601	2900	60	65,8	1,200	0,020	5,9	6700	2600	5162	0,244	0,097	20,487	0,039	321,319	9,8	48,0	62,2	-1,5
2/1/2005	9602	3200	60	64,0	1,202	0,020	6,2	6700	2600	5162	0,273	0,109	18,908	0,040	322,209	9,8	55,7	62,4	-0,7
2/1/2005	9603	3200	50	56,9	1,280	0,021	8,4	6700	2600	5162	0,284	0,113	21,811	0,043	322,835	9,8	117,7	62,5	5,6
2/1/2005	9604	2900	60	64,7	1,283	0,021	6,5	6700	2600	5162	0,236	0,094	23,049	0,039	323,527	9,8	62,5	62,7	0,0
2/1/2005	9605	3200	50	56,8	1,300	0,022	8,6	6700	2600	5162	0,254	0,101	24,772	0,043	324,180	9,8	123,1	62,8	6,1
2/1/2005	9606	3000	50	55,1	1,228	0,020	8,6	6700	2600	5162	0,233	0,093	26,130	0,044	325,284	9,8	133,5	63,0	7,2
2/1/2005	9607	3200	50	57,1	1,254	0,021	8,2	6700	2600	5162	0,256	0,102	23,557	0,043	325,993	9,8	106,3	63,2	4,4
2/1/2005	9608	3300	50	54,7	1,196	0,020	8,5	6700	2600	5162	0,204	0,082	29,192	0,044	325,993	9,8	117,2	63,2	5,5

Tabela 7 – Resultados de cálculo da altura média da camada de escória .

A partir destes cálculos e após execução de filtro para eliminar valores anormais, foram elaborados diversos gráficos para verificar possíveis relações de influência de variáveis sobre o nível de escória . Alguns destes gráficos são apresentados como exemplo nas figuras 37,38,39 ,40,.

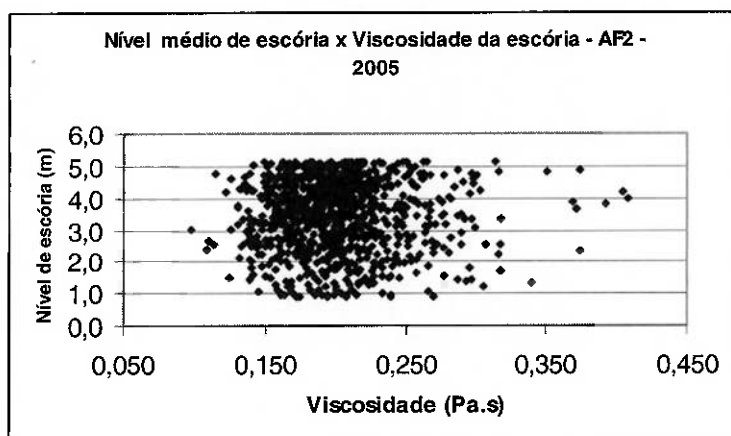


Figura 37 – Gráfico relacionando nível de escória e viscosidade da escória no ano de 2005.

Conforme se verifica não foi obtida correlação entre as variáveis e embora a teoria, os modelos físicos e a experiência prática mostrem que a viscosidade tem influência sobre o nível de escória, os níveis da variação de viscosidade no ano de 2005 não foram significativos para afetar o nível de escória.

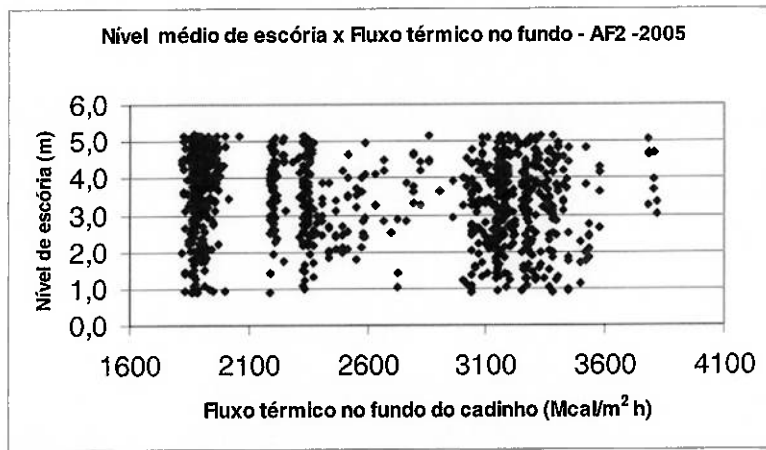


Figura 38 – Gráfico relacionando nível de escória X fluxo térmico no fundo do cadinho no ano de 2005.

A redução de fluxo térmico no fundo causa a formação de cascão no cadinho e a redução do volume útil disponível para armazenamento de líquidos (gusa e escória). Conforme já foi mostrado, houve grande variação no fluxo térmico em 2005 mas isto aparentemente não teve influência no nível de escória. Normalmente, quando o fluxo apresenta tendência de queda existe uma ação para reduzir a água de refrigeração do fundo do cadinho para fazer uma limpeza da região. A inversão da tendência de queda demora um período razoável, de algumas semanas, mas outras ações operacionais quanto ao controle de vazamento das corridas impede uma efeito maior sobre o nível de escória.

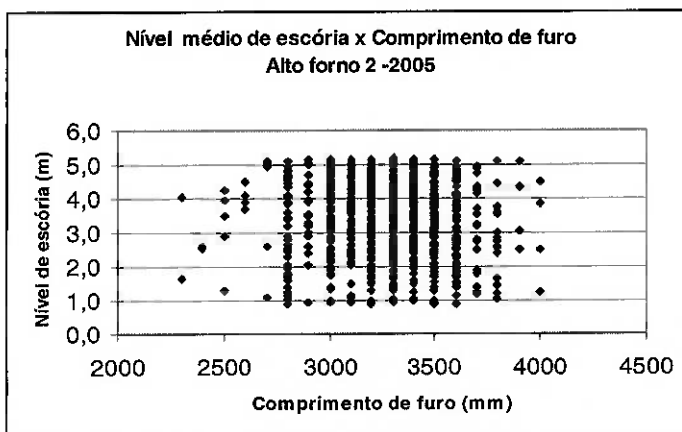


Figura 39 – Gráfico relacionando nível de escória e comprimento de furo no ano de 2005.

Na prática operacional um maior comprimento de furo vai proporcionar a operação com nível de líquidos mais baixo pois a interface gás-escória estará atingindo níveis mais inferiores no cadinho. Toda operação de alto forno tem como objetivo a obtenção de comprimento de furo de maiores valores ,acima de 3500mm em altos fornos de grande porte, visando:

- preservar a região do cadinho no furo, que sofre maior desgaste, assim como reduzir o fluxo de líquidos na parede refratária de carbono.
- manter o menor nível de escória no cadinho para segurança e estabilidade operacional.

Conforme mostrado no gráfico anterior, da figura 39, no caso dos dados disponíveis em 2005, não se verificou influência do comprimento de furo no nível de escória. Em condições de controle das demais variáveis, espera-se que menor comprimento de furo resulte em maior nível de escória residual.

A figura 40 apresenta o gráfico da vazão de ar soprado e oxigênio injetado pelas ventaneiras do alto forno e que resultam na geração de gases pela queima do coque que proporcionarão a produção de gusa através da redução do minério e sinter. Pelos estudos já apresentados na literatura, um aumento do nível de produção tem o efeito de elevação no nível de líquidos. Entretanto, no presente trabalho não foi possível obter tais relações com os dados utilizados.

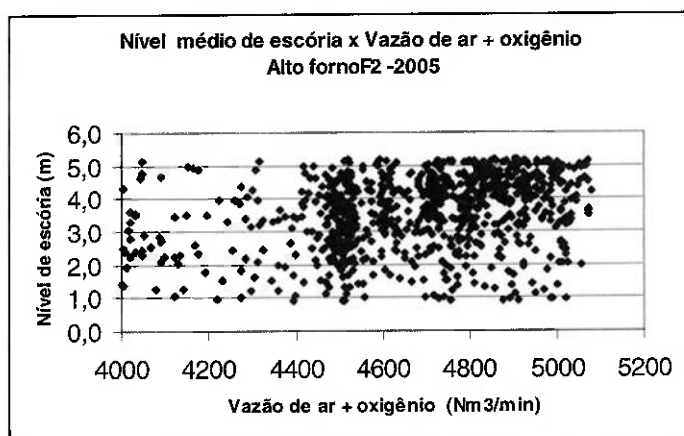


Figura 40 – Gráfico relacionando nível de escória e vazão de ar + oxigênio no ano de 2005.

Nas figura 41, 42 e 43, mostram-se os gráficos relacionando o nível de escória com diversos ensaios característicos do coque, para avaliar sua qualidade, que tem relação com sua degradação e que afetam a permeabilidade do cadinho. A reatividade do coque é um ensaio usado para verificar o efeito desta característica do combustível em termos do grau de consumo do mesmo até atingir a região do homem morto. Em termo práticos, maior reatividade vai gerar um coque com menor granulometria no cadinho com as implicação previstas, e registradas na literatura, em termos de redução da permeabilidade do homem morto. Conforme a equação de proposta por Fukutake e Okabe⁽²⁾, derivada da equação de Ergun a permeabilidade (ϵ) é um dos principais fatores para aumento da escória residual. No caso dos resultados analisados, também não foi obtida relação de influência de características do coque com o nível de escória. Nenhum dos resultados de ensaios do coque quanto a resistência mecânica a frio (DI), após reação (CSR – Coke Strength after Reaction) e reatividade apresentaram indícios de influência no nível de escória no período.

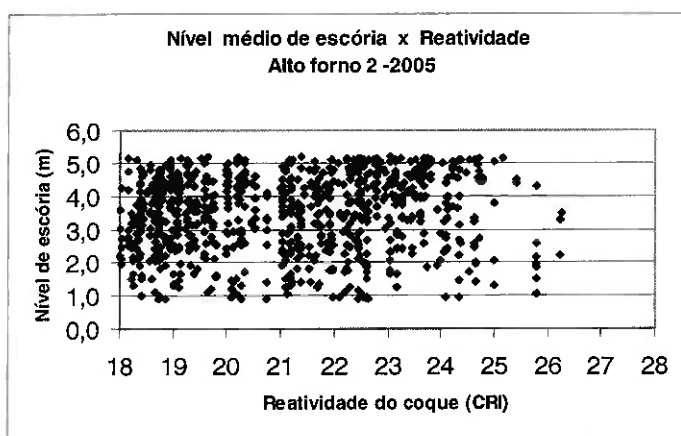


Figura 41 – Gráfico relacionando nível de escória e reatividade do coque.

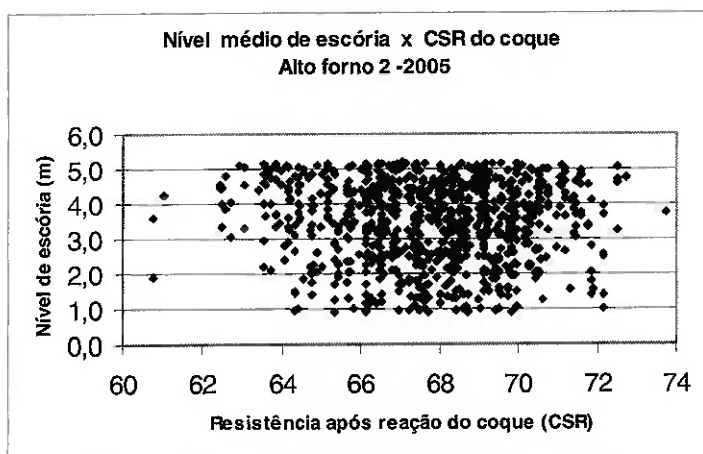


Figura 42 – Gráfico relacionando nível de escória e CSR do coque.

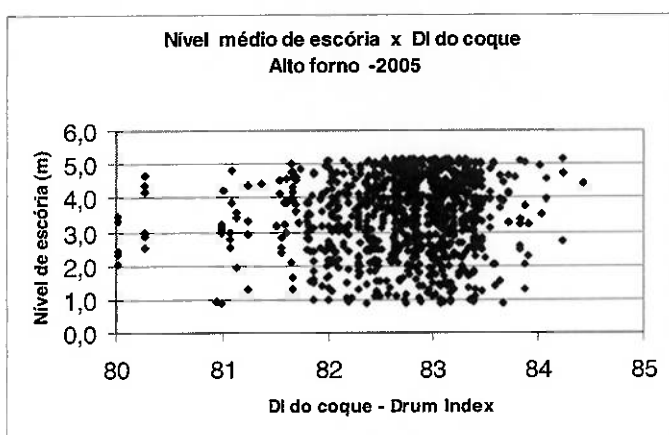


Figura 43 – Gráfico relacionando nível de escória e DI do coque.

Em síntese, todos os gráficos de dispersão elaborados não evidenciaram relação de influência das diversas variáveis sobre o nível de escória no cadinho para o período analisado. Mesmo usando diversas condições de restrição para filtro de corridas, conforme tabela 8, os gráficos obtidos não mostraram relações definidas.

Filtro	Objetivo
Corridas com intervalo de abertura de zero min a -15min	Eliminar o efeito de intervalo de corrida
Corridas com intervalo de abertura de -5min a 5 min	Restringir o efeito de corrida sobreposta (intervalo negativo)
Corridas com intervalo de abertura de zero min	Restringir o efeito de corrida sobreposta (intervalo negativo)
Corridas com ritmo de produção similar (para as condições anteriores)	Restringir o efeito da produção

Tabela 8 – Filtro para corridas do ano de 2005 visando eliminar a influência do intervalo de corrida e ritmo de produção no nível de escória no cadinho.

Na mesma análise destas corridas efetuada para o nível máximo de escória, também não se obteve uma relação de tendência de causa e efeito, conforme já foi comentado.

4.5 Análise das corridas por regressão linear múltipla

Os dados das corridas foram submetidos a análise estatística de regressão linear múltipla com uso do software STATISTICA. As análises foram efetuadas para todo o universo de corridas e também considerando o filtro das diversas corridas conforme listado na tabela 8 anterior.

Variável dependente	Variável com restrição	Faixa de valores	Número de corridas	R	R ²	Variáveis independentes
Nível máximo de escória (m)	Vazão de ar + oxigênio (Nm ³ /min)	5200-5400	878	0,16302	0,02658	Comprimento de furo , fluxo térmico DI , CSR, CRI, tamanho médio viscosidade da escória, viscosidade da mistura
		5300-5400	416	0,14681	0,02155	
	Comprimento de furo (mm)	3300-3700	1040	0,21869	0,04783	Vazão de ar, fluxo térmico DI , CSR, CRI, tamanho médio viscosidade d escória, viscosidade da mistura
		>3500	484	0,24910	0,06205	
	Intervalo de corrida (min)	-15 a 0	1515	0,18086	0,03271	Comprimento de furo, Vazão de ar fluxo térmico, DI , CSR, CRI, tamanho médio viscosidade d escória, viscosidade da mistura
		-5 a 0	622	0,25862	0,06689	
		-5 a 5	910	0,21090	0,04448	
		zero	210	0,15514	0,02407	

Tabela 9 – Resultados da análise de regressão linear múltipla para nível de escória máximo.

A análise de regressão não mostrou relação do nível de escória com as variáveis estudadas tanto para o nível máximo, estimado pelo tempo real de acúmulo de escória no cadinho, mostrado na tabela 8, quanto para o nível médio estimado pela equação de Bernoulli e mostrada na tabela 10:

Variável dependente	Variável com restrição	Faixa de valores	Número de corridas	R	R ²	Variáveis independentes
Nível médio de escória (m)	Vazão de ar + oxigênio (Nm ³ /min)	5200-5400	878	0,21263	0,04521	Comprimento de furo , fluxo térmico DI , CSR, CRI, tamanho médio viscosidade da escória, viscosidade da mistura
		5300-5400	416	0,34199	0,11696	
	Comprimento de furo (mm)	3300-3700	1040	0,18059	0,03261	Vazão de ar, fluxo térmico DI , CSR, CRI, tamanho médio viscosidade da escória, viscosidade da mistura
		>3500	484	0,22960	0,05272	
	Intervalo de corrida (min)	-15 a 0	1515	0,18803	0,03536	Comprimento de furo, Vazão de ar fluxo térmico, DI , CSR, CRI, tamanho médio viscosidade da escória, viscosidade da mistura
		-5 a 0	622	0,22611	0,05112	
		-5 a 5	910	0,21590	0,04661	
		zero	210	0,33984	0,11549	

Tabela 10 – Resultados da análise de regressão linear múltipla para nível de escória médio.

4.6 Avaliação dos dados do período de 2002 a 2007 da atual campanha do alto forno 2

Realizando análises com as médias diárias da atual campanha observa-se que existe uma influência do fluxo térmico no fundo do cadinho conforme gráficos das figuras 44 a 42 que mostram as relações entre variáveis.

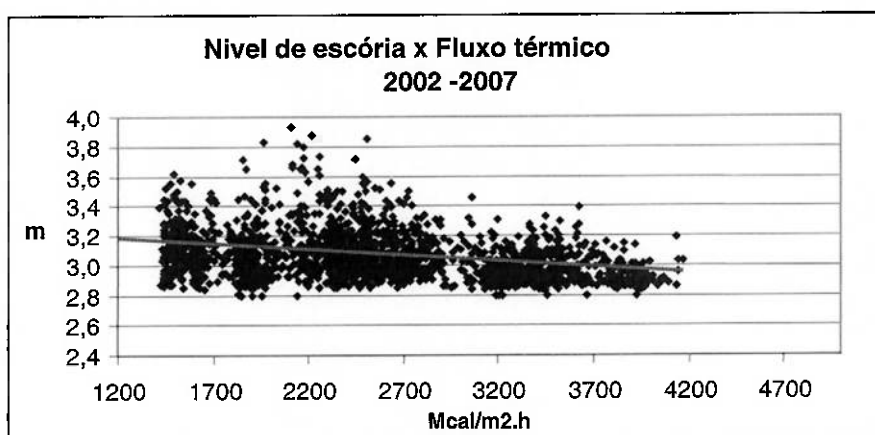


Figura 44 – Gráfico relacionando nível de escória má e fluxo térmico no fundo do cadinho.

Conforme já comentado, a redução do fluxo no fundo causa a formação de cascão e redução de volume útil. Deste modo, a operação com maior fluxo térmico no fundo proporciona menor nível de líquidos no cadinho. Warren et al.⁽⁴³⁾ registra em seu trabalho que há influência da temperatura do fundo do cadinho nas condições de drenagem do cadinho. Desse modo, maior fluxo favorece uma melhor drenagem.

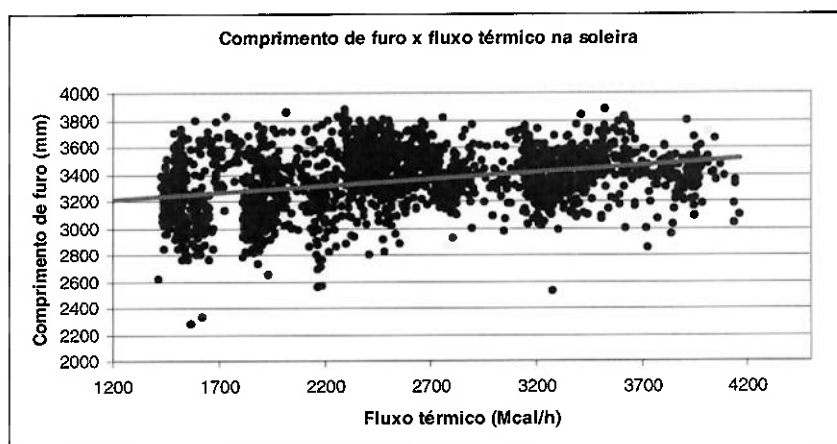


Figura 45 – Gráfico relacionando comprimento de furo e fluxo térmico no fundo do cadinho.

A maior circulação no centro e fundo do cadinho reduz o fluxo periférico que atua de forma mais agressiva para a erosão do refratário das paredes do cadinho e do próprio furo de corrida. Deste modo o aumento de fluxo térmico no fundo é mais favorável para a obtenção de maiores comprimentos de furo.

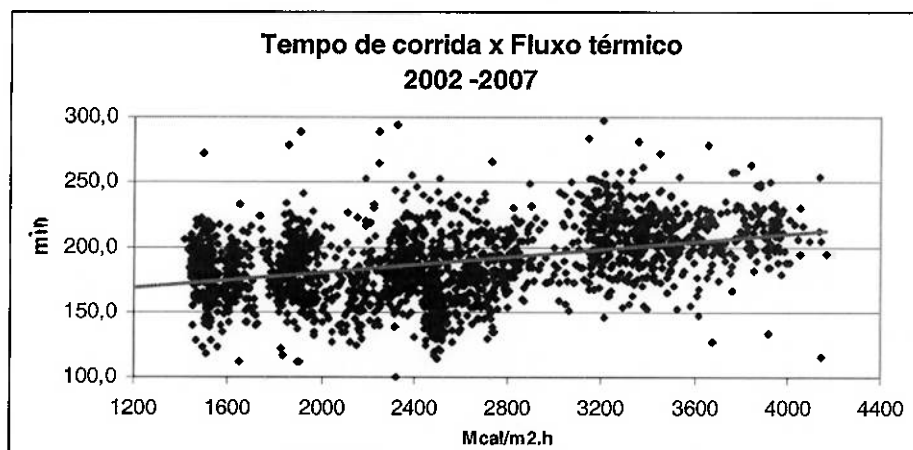


Figura 46 – Gráfico relacionando tempo de corrida e fluxo térmico no fundo do cadinho.

De acordo com o exposto antes, o mesmo efeito se observa para o tempo de corrida que aumenta à medida que o fluxo térmico fica mais alto. O maior comprimento de furo e menor presença de cascão no cadinho, contribuem para maiores tempos de vazamento cujo controle é item importante para a operação em termos de estabilidade de processo e custo de produção. Wanren et al.⁽⁴³⁾ comenta que o aumento da temperatura do fundo do cadinho contribui para melhorar o tempo de corrida .

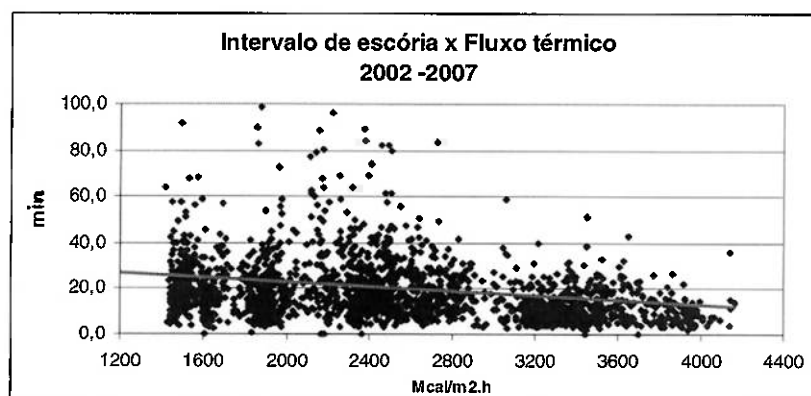


Figura 47 – Gráfico relacionando o intervalo de escória e fluxo térmico no fundo do cadinho.

O intervalo de escória, também denominado atraso de escória, é um dos controles essenciais para a estabilidade do processo do alto forno. A drenagem deficiente da escória pode causar distúrbios de marcha, por elevação da pressão dos gases, assim como perda de temperatura do gusa pois a escória retida reduz o aporte térmico no cadinho. Na análise de dados da campanha e pela experiência prática verifica-se que o fluxo térmico no fundo do cadinho é uma variável importante a ser controlada.

5 CONCLUSÕES

Os dados das corridas de 2005 do alto forno 2 da COSIPA não mostraram correlação do nível de escória com as variáveis potenciais de influência na drenagem do cadinho, determinadas por modelos físicos e matemáticos, relatados na literatura técnica. A falta de correlação pode ser atribuída a fatores como:

- grande número de variáveis com influência no processo do alto forno.
- valores médios imprecisos adotados para determinadas variáveis relacionados a cada corrida.
- adoção de valores constantes para a fração de vazios do cadinho, na estimativa do nível de escória máximo, em um processo dinâmico como o alto forno em que o coque do homem morto deve ter variações que alteram este valor.
- a tecnologia atual do alto forno 2 da COSIPA é insuficiente para estimar o nível de líquidos no cadinho, com cálculo de balanço de massas e volumétrico, principalmente quanto à medição de peso de escória, que é estimado.
- a estimativa do nível de escória médio através de uma equação da Física, estabelecida em condições especiais de experiência, usando dados industriais apresenta grandes variações e torna necessário novos estudos para ajustar a equação.
- conforme relatos na literatura, algumas variáveis realmente tem pouca influência no nível de escória como a viscosidade, cujos valores em operação normal do alto forno tem variações pequenas que não exerceram influência significativa em 2005, assim como o comprimento de furo para valores superiores a 3,0 m.
- o fluxo térmico no fundo do cadinho apresenta tendência de influência sobre variáveis de drenagem no decorrer da campanha do alto forno, estando de acordo com registros existentes na literatura.
- são necessários estudos mais complexos e instalação de novos instrumentos de medição, para melhorar os cálculos de balanço de massa e volumétrico, no sentido de aumentar o conhecimento e controle sobre o processo da drenagem no alto forno 2 da COSIPA.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. TAVARES, R.P.; FIGUEIRA, R.M. Curso de Desenvolvimento da Tecnologia de alto forno. UFMG, 1984.
2. FUKUTAKE, T.; OKABE, K. The Hearth Drainage of the Blast Furnace. In: International Blast Furnace Hearth and Raceway Symposium, Newcastle, pp. 2.1-11, 1981.
3. MCCARTHY, M.J.; BURGESS, J. M.; PINCZEWSKI, W.V. Studies of Liquid Drainage from Blast Furnace Hearths. BHP technical bulletin. Vol. 26, n° 12, 1982.
4. 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.
5. PEREIRA, F.J.N. Estudo da drenagem de líquidos de cadinhos de altos fornos. Tese de Dissertação de Mestrado. UFMG. 1990
6. 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.
7. NOGAMI, H.; TODA, K.; PINOWANTORO, 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. 2150-2158, 2004.
8. 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.
9. NISHIOKA, K.; MAEDA, T.; SHIMIZU, M. A Three-dimensional Mathematical Modeling of Drainage Behavior in Blast Furnace Hearth. ISIJ International, vol. 45, n°5, pp. 669-676, 2005.
10. 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.
11. NOUCHI, T.; YASUI, M.; TAKEDA, K. Effects of Particle Free Space on Hearth Drainage Efficiency. ISIJ International. Vol. 43, N°2, pp 175-180. 2003.
12. 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. 1514-1520, 2005.

13. CHEN, A.; ELSAADAWY, E.; LU, W. K. Physical Modeling of Flows in the Blast Furnace Hearth. Iron & Steel Technology Conference Proceedings. Vol. I. Charlotte, North Carolina, USA. May 9-12, 2005.
14. TANZIL, F.W.B.U.; BEAN, I.; NIGHTINGALE, R. J.; ZULLI, P. Blast furnace hearth drainage: continuous casting. Proceedings ICSTI. 2006.
15. SAXÉN, H.; BRÄNNBACKA, J. Modeling the Liquid Levels in the Blast Furnace Hearth. TRANSACTION ISIJ, vol. 41, n°10, pp. 1131-1138, 2001.
16. BRÄNNBACKA, J.; TORRKULLA, J.; SAXÉN, H. Modeling the Drainage of the Blast Furnace Hearth. Ironmaking Conference Proceedings. Pp. 313-322, 2001.
17. 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, Lulea, Sweden, vol. 1 pp. 103-102. June 2004.
18. CHEW, S. J.; ZULLI, P.; YU, A. Modeling of Liquid Flow in the Blast Furnace. Application in a comprehensive Blast Furnace Model. TRANSACTION ISIJ, vol. 41, n°10, pp. 1122-1130, 2001.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. NIGHTINGALE, R.J.; TANZIL, F.W.B.U. A Novel Approach in the Estimation of Blast Furnace Hearth Voidage. Iron and Steelmaking. February 1997.
23. 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.
24. BRÄNNBACKA, J.; TORRKULLA, J.; SAXÉN, H. Simple simulation model of blast furnace hearth. Ironmaking and Steelmaking. Vol.32. N°6. 2005.
25. GANDRA, B. F.; SCUDELLER, L.A. M.; CASTRO, J. A.; CASTRO, L.F.A. Fluxo de líquidos do Cadinho do Alto Forno. XXXV Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, ABM. Florianópolis, SC, 2005.

26. CAMPBELL, P.J.; STANDISH, N. Diagnosing Blast Furnace Hearth Conditions. Ironmaking and Steelmaking. September. 1984
27. NEGRO, P.; PETIT, C.; URVOY, A.; SERT, D.; PIERRET, H. Characterization of the permeability of the blast furnace lower part. La Revue de Métallurgie-CIT; Juin 2001.
28. LEBED, P.K.; SAFINA, L.A.; DEMIDENKO, T.V.; SEMENKO, A.YA.; POCHKAILO, I.E. Evaluating work of blast furnace hearth from nature of emf variation. Steel in USSR. Vol.20 February, 1990.
29. 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.
30. CHEN, A.; ESLSAADAWY, E.; LU, W-K. Physical Modeling of 3D Flow in the Blast Furnace Hearth. AISTech 2006 Proceedings. Volume 1 . pag 123-131.
31. PANJKOVIC, V.; TRUELOVE, J.S.; ZULLI. Numerical Modeling of Iron Flow and Heat Transfer in Blast Furnace Hearth. Ironmaking and Steelmaking, vol. 29 pp. 390-400, 2002.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. TORRKULLA, J. ; BRÄNNBACKA, J.; SAXÉN, H.; WALLER, M. Indicator of the Internal State of the Blast Furnace Hearth. TRANSACTION ISIJ, vol. 42 n°5, pp. 504-511, 2002.
36. HUANG, D.; MILOVA, P. ; CHEN, Z.; ZHAO, Y.; CHAUBAL, P. ZHOU, C.Q.. Analysis of Liquid Level and Profile Inside the Hearth of a Blast Furnace. AISTech 2006 Proceedings. Volume 1.
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). Stockolm, Sweden. PP. We4:5-1 ~19, June 2005.

38. 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.
39. HAVELANGE, O.; DANLOY, G.; FRANSSEN, C. The Dead Man, Floating or Not? La Revue de Metallurgie-CIT, pp. 195-201, March, 2004.
40. ZHAO, M.; ZHANG, L.; CHEGN, S. Numerical simulation and parametric study of residual slag volume in blast furnace hearth during hearth drainage. Proceedings ICSTI. 2006.
41. MITSUI, H.; TORITANI, Y.; YAMANE, T.; S. YAMASAKI, S.; OGUCHI, Y. , KAWAKAMI, T. Recent Developments in Tap Hole Mud for Blast Furnaces. Aachen Proceedings, 1988.
42. NAKAMOTO, M.; TANAKA, T.; LEE, J.; USUSI, T. Evaluation of Viscosity of Molten $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ Slags in Blast Furnace Operation. ISIJ International, vol. 44, n° 12, pp. 2115-2119, 2004.
43. WANREN, XU; YONGZHONG, Z; LONGLAI, Z. Improving of hearth active condition during long-term production with high PCR. Proceedings ICSTI. 2006.