

DIMINUIÇÃO DO CONSUMO DE ÁCIDO CLORÍDRICO NA LINHA DE DECAPAGEM (1)Autores:

Álvaro Bettini (2)
Carlos Alberto Pereira (3)
Carlos Alberto Costa (4)
Marcos Artur Rocha (5)

R E S U M O

A diminuição do consumo de ácido clorídrico na Linha de Decapagem nº 2 da COSIPA tornou-se uma necessidade fundamental e imediata. Para que este objetivo pudesse ser atingido, vários fatores concorreram diretamente; dentre todos, este trabalho destaca um dos mais importantes que é o da organização e desenvolvimento da Manutenção na Unidade de Regeneração de Ácido Clorídrico.

-
- (1) Contribuição Técnica à COLAM para ser apresentada no Seminário Sobre Laminação, setembro de 1981 - Rio de Janeiro - RJ.
 - (2) Técnico de Desenvolvimento da Gerência de Laminação da COSIPA.
 - (3) Técnico de Desenvolvimento da Gerência de Laminação da COSIPA.
 - (4) Técnico de Desenvolvimento da Gerência de Laminação da COSIPA.
 - (5) Técnico da Unidade de Ácido da Gerência de Laminação da COSIPA.

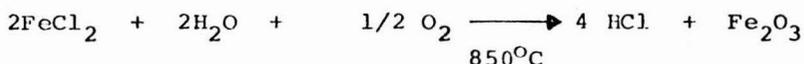
1 - INTRODUÇÃO

A decapagem tem por objetivo retirar a camada de óxido, chamada de carepa, que cobre as chapas laminadas a quente.

O aço quando é decapado pelo ácido clorídrico tem a seguinte reação:



No processo de regeneração, o cloreto ferroso é transformado em ácido clorídrico (HCl) e óxido férrico (Fe_2O_3) a alta temperatura de acordo com a equação:



A regeneração de ácido clorídrico da COSIPA consiste de duas unidades que operam segundo o processo Lurgi, fornecidas pela Keramchemie.

Cada unidade regenera 2.775 lt/h de ácido clorídrico com 18% de concentração e libera 350 kg/h de óxido de ferro granulado como sub-produto. A eficiência da unidade é de 98%.

A solução saturada de cloreto de ferro e com baixa concentração de ácido (1) para ser regenerada é enviada por uma bomba (2) para o venturi e pré-evaporador (3), aqui a solução fica em constante circulação e estando em contato direto com os gases quentes provenientes do reator, aquece-se e por evaporação a densidade vai aumentando.

Quando a solução atinge a densidade de cerca de 1,45, parte dela é desviada para o reator (4) onde a solução é queimada com decomposição em gás clorídrico e óxido de ferro.

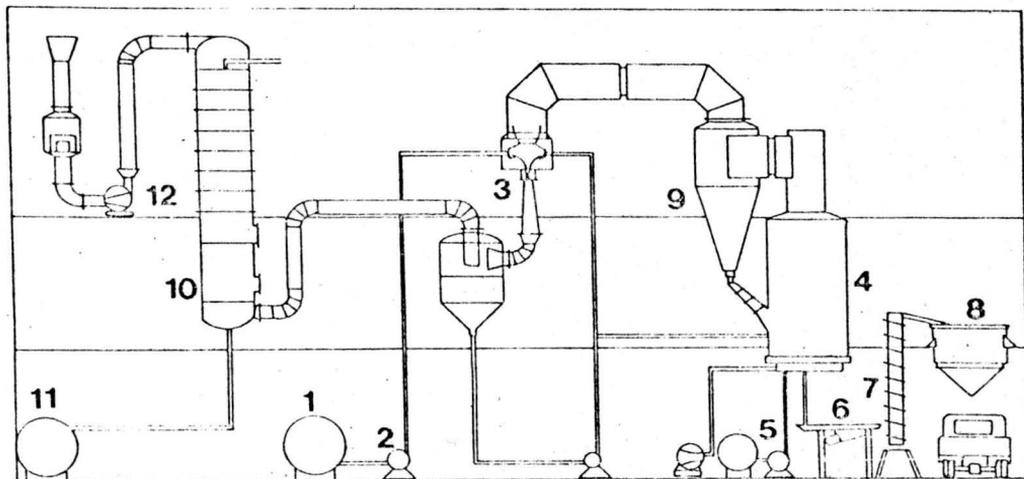
O gás clorídrico formado no reator passa pelo ciclone (9), onde ele se liberta das partículas de óxido e estas por sua vez retornam para o reator através de uma tubulação que liga o ciclone ao reator.

Do ciclone os gases passam pelo venturi e pré-evaporador (3) e após troca de calor com a solução em circulação, os gases são arrastados por exaustão para o absorvedor (10).

No absorvedor os gases entram pela parte inferior e são absorvidos pela água que é lançada pela parte superior do absorvedor. Obtém-se uma solução ácida a 18%.

A solução regenerada é estocada em um tanque externo (11) de onde bombeada para os tanques de decapagem.

O óxido produzido é descarregado do reator através de três válvulas para os silos.



1 - SOLUÇÃO A REGENERAR

2 - BOMBA

3 - VENTURI E PRÉ-EVAPORADOR

4 - REATOR

5 - RESERVATÓRIO DE ÓLEO

6 - ALIMENTADOR DO VIBRO-TRANSPORTADOR

7 - VIBRO-TRANSPORTADOR

8 - SILO DE ÓXIDO

9 - CICLONE

10 - ABSORVEDOR

11 - TANQUE DE SOLUÇÃO REGENERADA.

12 - EXAUSTOR.

2 - DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento de estudos, pesquisas e trabalho, envolvendo as partes fundamentalmente interessadas, no caso específico, Operação/Ma_untenção, objetivou um rendimento maior com um baixo consumo de ácido clorídrico na Unidade de Regeneração.

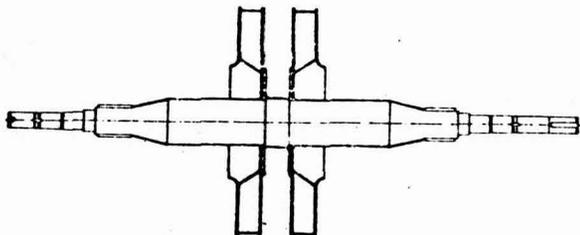
Após as áreas de envolvimento de cada parte interessada definida, estabeleceu-se que:

OPERAÇÃO - Passou a operar dentro dos parâmetros determinados pela Keramchemie, isto é, temperaturas, depressões, vazão de solução de águas de lavagem, etc. visando um melhor rendimento da Unidade de Regeneração.

MANUTENÇÃO - Após pesquisas efetuadas tanto no âmbito da COSIP como no mercado externo, estudou-se e chegou-se a uma viabilidade de modificação de equipamento envolvendo novos tipos de peças e materiais, isto é, conjunto e sub-conjuntos do equipamento em questão. Com isto, atendeu-se a necessidade a qual se propunha todo o processo de desenvolvimento, que era de manter sempre as unidades em condições de operação consideradas ótimas, como também observando o processo de reciclagem.

No relato deste trabalho, verificaremos que o maior responsável pela boa eficiência do equipamento foram os trabalhos desenvolvidos pela manutenção, os quais descreveremos a seguir:

2.1 - Exaustor

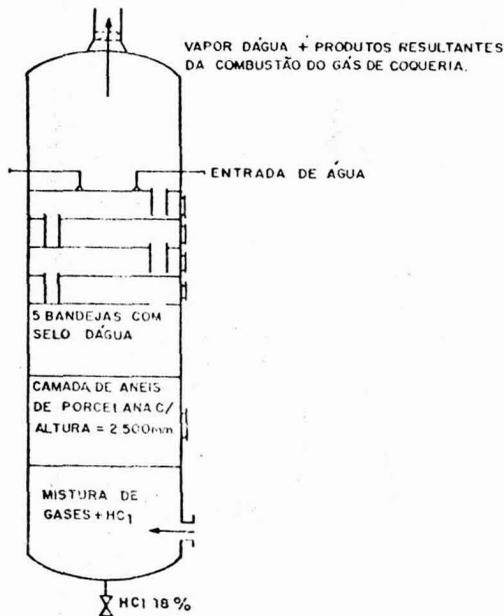


Finalidade - Succionar a mistura de gases do processo e expelir para a atmosfera os gases resultantes da combustão do gás de Coqueria.

Problema - Deterioração do revestimento de ebonite dos rotores dos exaustores por erosão e posterior corrosão da estrutura metálica. Não se conseguindo obter no mercado nacional um bom revestimento dos rotores.

Solução - Especificada uma liga de titânio para os rotores e em operação a mais de três anos com ótimo resultado.

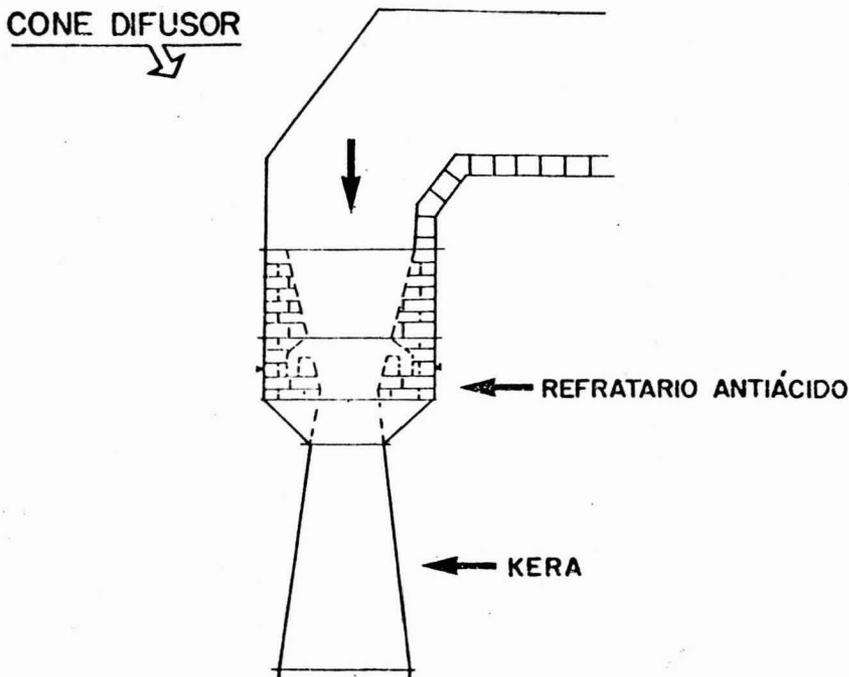
2.2 - Absorvedor



Finalidade - Absorver o gás clorídrico, formando uma solução com concentração de 18%.

Problema - Baixo rendimento do absorvedor, pela não formação de um bom selo de água e como consequência parte do gás clorídrico a ser absorvido era jogado para a atmosfera.

Solução - Inicialmente foi aberto o absorvedor nº 2 com a supervisão da Keramchemie e mão de obra da COSIPA, objetivando eliminar o problema bem como a aprendizagem de uma correta manutenção nos absorvedores. A seguir, foi efetuada a manutenção no absorvedor nº 1 com todo o serviço executado pelo pessoal da COSIPA, como ótimo resultado. Assim, a unidade de Regeneração voltou a operar com rendimento normal.

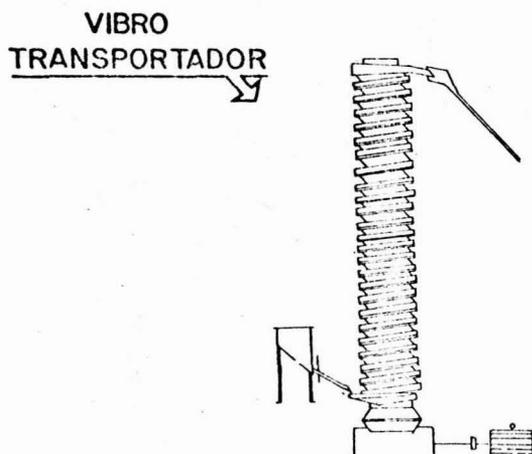


Finalidade - Interligar o venturi com o pré-evaporador, onde se processa a passagem dos gases quentes provenientes do reator mais a solução a regenerar em recirculação.

Problema - Queima do cone, causando:

- a) Desregulagem dos parâmetros, por sucção do ar ambiente quebrando o vácuo existente na unidade.
- b) Vazamento de solução a regenerar.

Solução - Os cones originais eram de Kera (resina fenólica), com a queima foi necessária a substituição, mas no mercado nacional não existe este tipo de resina; decidimos pela importação e durante o tempo de espera da vinda das peças do exterior efetuamos várias tentativas com o revestimento do cone sem resultado positivo, pois as resinas queimavam. Finalmente instalamos um cone de titânio que está dois anos em operação com ótimo resultado.

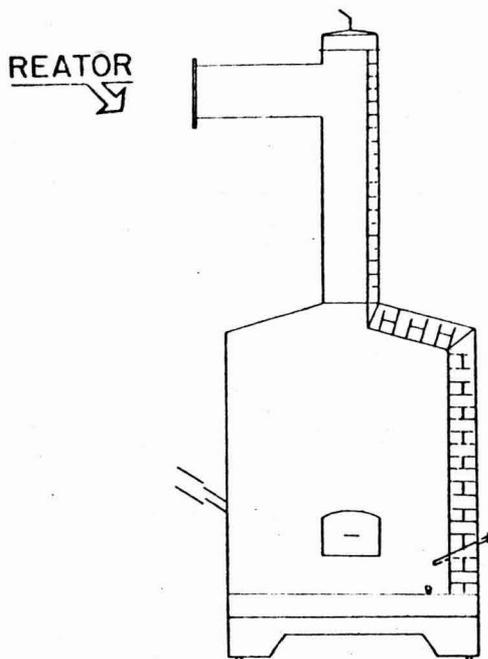


Finalidade - Resfriar o óxido retirado do reator e transportar o óxido até o silo de estocagem.

Problema - Dificuldade de se obter material sobressalente no mercado nacional, bem como dificuldade na confecção das calhas do vibro-transportador.

Solução - Substituído o vibro-transportador por um sistema de descarga direta do óxido do reator para os silos de estocagem, obtendo-se as seguintes vantagens:

- a) Melhores condições operacionais de descarga do óxido do reator.
- b) Diminuição do custo de manutenção.



Finalidade - É no reator que ocorre a reação da solução a regenerar e o oxigênio injetado no interior do reator, tendo como catalizador a temperatura. Como resultado desta reação temos o ácido clorídrico e óxido férrico. O reator é revestido com tijolos refratários e possui 2 queimadores iniciais e 48 queimadores principais.

Problema - Devido a paradas irregulares nas unidades no início de operação, ocorreu uma degradação dos tijolos refratários, acarretando:

- a) Entupimento do sistema de retorno de pó.
- b) Desgaste anormal do selo mecânico das bombas de recirculação.
- c) Entupimento das bocas de descarga do óxido.
- d) Condição insegura de trabalho para a manutenção e operação.
- e) Formação de pedras de óxido na base do reator.

Soluções:

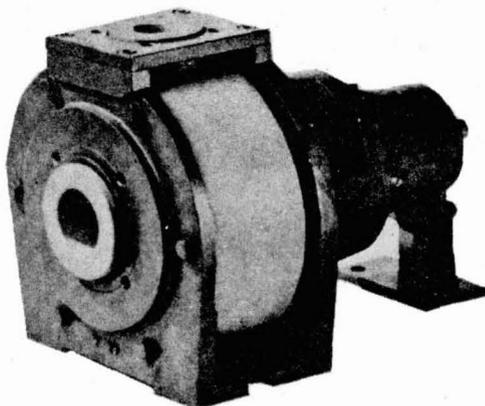
1 - Troca dos refratários dos reatores, utilizando-se matéria prima nacional e mão-de-obra da COSIPA.

Nas soleiras dos reatores foram colocados tijolos de alta-alumina em substituição a camada de concreto refratário. Na base do reator

estão localizados os queimadores e ficava bastante danificada, sendo que os reparos para nivelamento eram difíceis, principalmente nas laterais. Com a aplicação dos tijolos de alta-alumina eliminamos os constantes reparos na base do reator.

2 - Posicionamento da lança no sentido horizontal, obtendo-se aumento da eficiência das unidades de regeneração devido a melhor distribuição da solução na camada fluidizante.

2.6 - BOMBAS DE RECIRCULAÇÃO



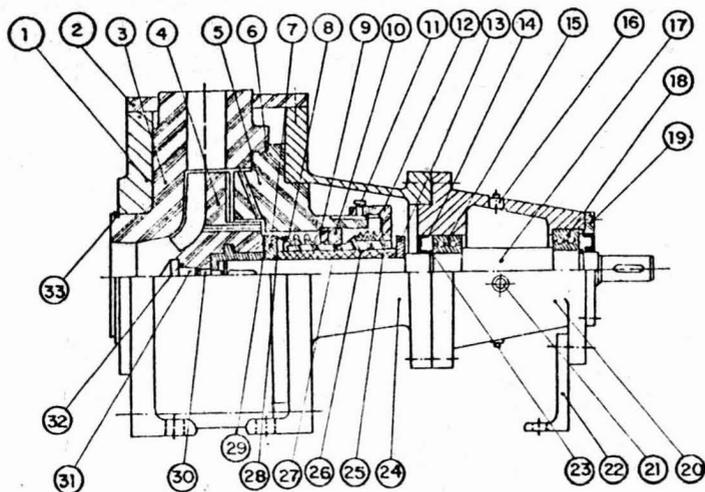
Finalidade - Recircular a solução a regenerar no pré-evaporador até que a concentração de ferro atinja 230 g/lt, quando então é enviada para o reator.

Problema - As bombas originais eram importadas e estavam trabalhando com deficiência, causando baixo rendimento da Unidade, não sendo possível a normalização das bombas pela falta de peças sobressalentes no mercado nacional.

Solução - Substituição das bombas importadas por bombas nacionais, que proporcionaram as seguintes vantagens:

- a) Fácil e rápida manutenção.
- b) Sobressalentes de fácil aquisição.
- c) Custo da bomba nacional abaixo da importada.
- d) Assistência técnica rápida quando necessária.

SELOS MECÂNICOS DAS BOMBAS de RECIRCULAÇÃO



- | | |
|-------------------------|------------------------|
| 1 - FLANGE DE SUCCÃO | 18 - ROLAMENTO |
| 2 - FLANGE DE RECALQUE | 19 - TAMPA |
| 3 - CAIXA | 20 - MANCAL |
| 4 - ROTOR | 21 - VISOR |
| 5 - TAMPA | 22 - APOIO DO MANCAL |
| 6 - ANEL "O" | 23 - ANEL ELÁSTICO |
| 7 - ANEL DE SELAGEM | 24 - CARÇAÇA |
| 8 - JUNTA DE SELAGEM | 25 - BUCHA DE CANHÃO |
| 9 - ANEL DE VEDAÇÃO | 26 - MOLA PRATO |
| 10 - PORCA | 27 - BUCHA DE APERTO |
| 11 - PARAFUSO TRAVA | 28 - ANEL "O" |
| 12 - PORCA DE REGULAGEM | 29 - ANEL DE VEDAÇÃO |
| 13 - ANEL DE ENCOSTO | 30 - PARAFUSO DO ROTOR |
| 14 - RETENTOR | 31 - LACRE DO ROTOR |
| 15 - ROLAMENTO | 32 - ANEL "O" |
| 16 - BUJÃO | 33 - ANEL ELÁSTICO |
| 17 - EIXO | |

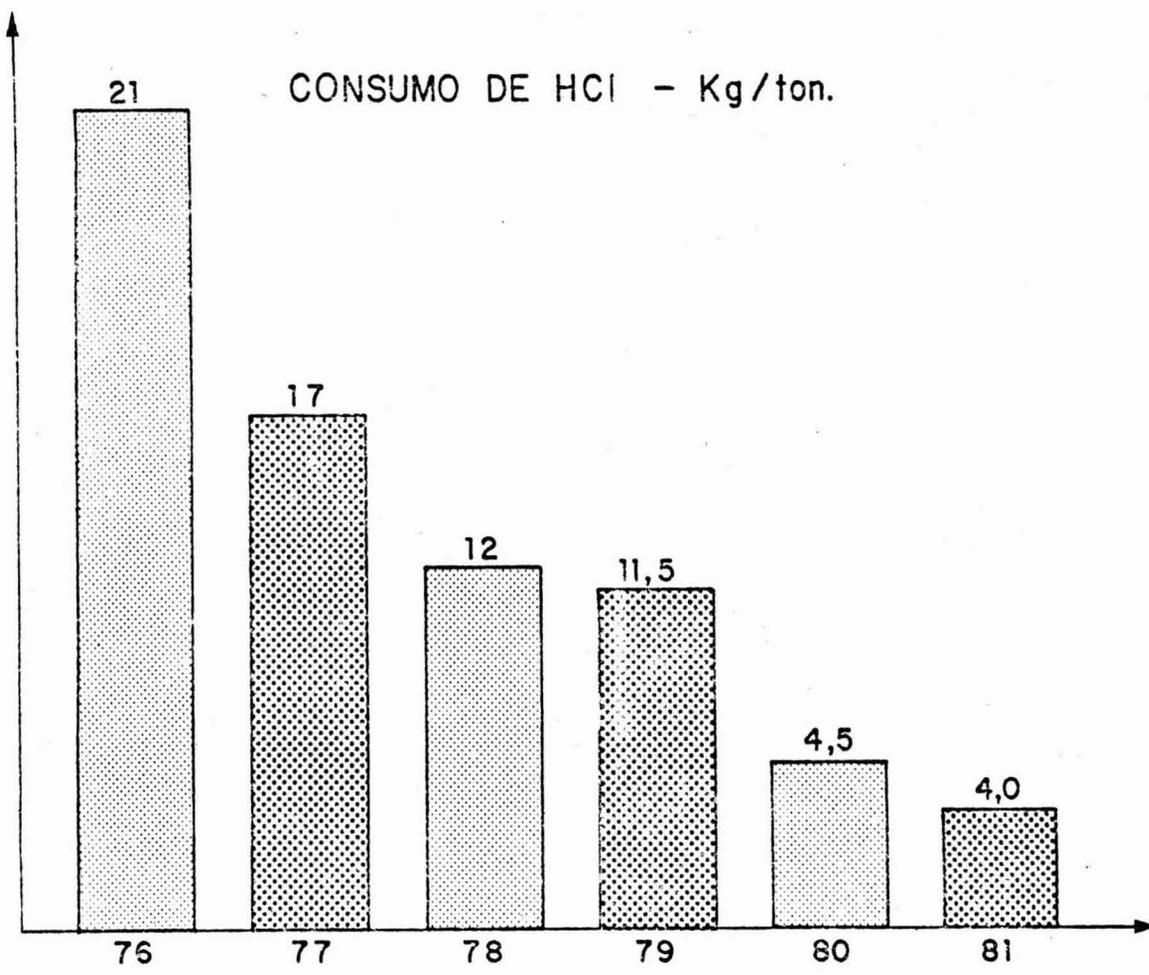
Finalidade - O selo mecânico funciona como um retentor para impedir o contacto da solução ácida com as partes metálicas da bomba de recirculação.

Problema - Má refrigeração devido a baixa pressão da água, causando desgaste anormal do selo mecânico.

Solução - Aumentar a pressão da água de refrigeração do selo mecânico, através de uma picagem da caixa de água de emergência da Unidade de Regeneração melhorando a refrigeração e a instalação de um separador de abrasão, obtendo-se com estas medidas um aumento da vida útil do selo mecânico.

3 - CONSIDERAÇÃO FINAL

Com a manutenção da Unidade de Regeneração de Ácido Clorídrico tornando-se eficiente, o processo operacional de reciclagem que era de 6 dias, dobrou, passando cada unidade a trabalhar 12 dias consecutivos com resultados excelentes: regenerando uma quantidade maior de solução e proporcionando uma diminuição de consumo do ácido clorídrico.



Heraldo Leite de Andrade (2)
Alberto José Roldán (3)
Gustavo Acácio Corrêa Hauck (2)

R E S U M O

Neste trabalho são mostrados os balanços térmicos dos fornos de reaquecimento de placas da linha de laminação a quente, assim como os resultados da eficiência térmica e rendimento teórico.

A sistemática seguida se baseia na utilização de um modelo de cálculo por computador, o qual permite uma rápida avaliação dos resultados para qualquer condição existente, fornecendo assim, uma ferramenta eficaz para o controle do forno.

-
- (1) - Contribuição Técnica ao Seminário sobre Laminação-81 da CO LAM - Rio de Janeiro - Setembro de 1981.
 - (2) - Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista da Unidade de Pesquisa de Processos de Conformação do Centro de Pesquisas da USIMINAS - Ipatinga, MG.
 - (3) - Membro da ABM; Engenheiro Mecânico da Unidade de Pesquisa de Processos de Conformação do Centro de Pesquisas da USIMINAS - Ipatinga, MG.

1. INTRODUÇÃO

A siderurgia, como um dos principais consumidores de energia, se vê colocada diante de um desafio, qual seja, a necessidade imperiosa da pesquisa e introdução de novas práticas e de melhorias de processo, visando a diminuição do consumo global de energia, especialmente no tocante ao consumo de óleo combustível.

A fim de se analisar o desempenho térmico dos fornos de reaquecimento de placas da USIMINAS e de servir como base para um futuro controle de processo, tornou-se necessário a quantificação das diferentes parcelas que contribuem para a geração e perda de calor nos mesmos.

Neste trabalho, desenvolveu-se um método para o cálculo do balanço térmico de ditos fornos, possibilitando o conhecimento de suas eficiências térmicas e a análise e seleção de medidas destinadas a melhorar seus desempenhos.

Tal método foi programado para o computador, o que permite a repetição rápida dos cálculos a qualquer momento, seja devido a modificações realizadas nos padrões de operação, seja em consequência da necessidade da introdução da eficiência térmica como um dos parâmetros de controle sistemático do forno, com uma periodicidade definida.

2. OBJETIVOS

a) Desenvolvimento de um método para cálculo de balanço térmico, de eficiências térmicas e rendimentos teóricos dos fornos de reaquecimento de placas da linha de laminação a quente da USIMINAS.

b) Elaboração por computador de um relatório, de tipo gerencial, sobre o desempenho dos fornos em seus diferentes padrões de funcionamento.

c) Fornecimento de subsídios para melhoria das condições de operação dos fornos.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 - Características dos Fornos

A tabela I permite observar as características dos diferentes fornos de rea aquecimento da USIMINAS.

TABELA I - Características dos fornos de rea aquecimento das linhas de tiras a quente e chapas grossas

ITEM \ FORNO	F2, F3 TIPO PUSHER	F4 WALKING BEAM-TO	F5 WALKING BEAM-CG
Nº ZONAS	3	6	6
COMPRIMENTO EFETIVO (mm)	30.000	30.000	30.000
LARGURA INTERNA (mm)	6.400	13.000	8.200
COMBUSTÍVEL	COG, BFG (misto)	COG, BFG (misto)	ÓLEO
CAPACIDADE NOMINAL (t/h)	100	264	130
Nº QUEIMADORES	20	50	30
RECUPERADOR	CERÂMICO	CERÂMICO	CERÂMICO

3.2. Análise Teórica do Balanço Térmico

A análise teórica, para o cálculo do balanço térmico global dos fornos em seus diferentes padrões de funcionamento, foi dividida em duas partes: calor de entrada e calor de saída.

- Calor de entrada (QE)

As parcelas que compõem o calor de entrada são:

- a) calor de combustão do óleo ou gás misto;
- b) calor sensível do combustível;
- c) calor sensível do ar de combustão;
- d) calor sensível do vapor de atomização;

e) calor de formação de carepa.

- Calor de combustão (Q_{COMB})

$$Q_{\text{COMB}} = V_{\text{COMB}} \times \text{PCI} \quad (1)$$

onde:

V_{COMB} = vazão horária de combustível (l/h) ou (Nm^3/h)

PCI = poder calorífico inferior do combustível
(kcal/l) ou (kcal/ Nm^3)

- Calor sensível do combustível ($Q_{\text{S COMB}}$)

Foi calculado, para o óleo, através da expressão

$$Q_{\text{S COMB}} = V_{\text{COMB}} \times C_{\text{ÓLEO}} \times \rho_{\text{ÓLEO}} \times (\theta_e - \theta_a) \quad (2)$$

sendo:

$C_{\text{ÓLEO}}$ - calor específico do óleo = 0,5(kcal/kg °C)

$\rho_{\text{ÓLEO}}$ - densidade do óleo = 0,9 kg/l

θ_e - temperatura de aquecimento do óleo (°C)

θ_a - temperatura ambiente (°C).

Dado que nos fornos que funcionam com gás misto, este não é preaquecido, esta parcela vale zero (para tais fornos).

- Calor sensível do ar de combustão ($Q_{\text{S AR}}$)

O ar necessário à combustão é succionado, por meio de um blower, da atmosfera e passa através de um recuperador cerâmico onde é aquecido pelos gases de exaustão.

Neste ar está presente uma certa quantidade de vapor d'água, correspondente à sua umidade relativa e dada pela equação :

$$V_{\text{vapor}} = \frac{U \times P_S \times V_{\text{AR}}}{760} \quad (3)$$

onde:

V_{vapor} - vazão de vapor d'água presente no ar de combustão (Nm^3/h)

U - umidade relativa do ar (%)

V_{AR} - vazão de ar de combustão (Nm^3/h)

PS - pressão de saturação do vapor d'água (mmHg)

O valor de PS foi obtido a partir da expressão

$$\log PS = - \frac{2900}{T} - 4,65 \log T + 22,603 \quad (4)$$

na qual:

T - temperatura absoluta do ar de combustão (K), antes de sua entrada no recuperador.

Para a determinação do calor sensível do ar de combustão considerou-se o mesmo composto somente de O_2 , N_2 e H_2O (vapor).

Assim, temos

$$QS_{AR} = M_{O_2} \times H_{O_2} + M_{N_2} \times H_{N_2} + M_{VAPOR} \times H_{VAPOR} \quad (5)$$

sendo:

M_x - número de moles da substância x presente no ar de combustão/h.

H_x - entalpia da substância x à temperatura T na qual o ar é preaquecido (kcal/mol).

Os valores de entalpia do O_2 , N_2 e vapor d'água, em função da temperatura, podem ser vistos no apêndice I e estão referidos a $25^\circ C$.

- Calor sensível do vapor de atomização (QS_{VA})

O calor deste agente nebulizador, utilizado somente nos fornos que consomem óleo, é calculado pela expressão:

$$QS_{VA} = M_{VA} \times H_{VA} \quad (6)$$

onde:

M_{VA} - número de moles de vapor de atomização/h

H_{VA} - entalpia do vapor de atomização à temperatura T na qual é aquecido (kcal/mol).

Considerou-se a descompressão sofrida pelo vapor de atomização na câmara de combustão como uma transformação isoentálpica, obtendo-se o valor de H_{VA} por meio de uma regressão polinomial, a partir dos dados do diagrama entropia-entalpia para vapor d'água.

Temos então que

$$H_{VA} = (1036,8 + 0,894 \times T_A - 0,268 \times 10^{-2} \times T_A^2 + 0,596 \times 10^{-5} \times T_A^3 - 0,565 \times 10^{-8} \times T_A^4) \times 9,99 \times 10^{-3} \text{ (kcal/mol)} \quad (7)$$

sendo:

T_A - temperatura do vapor de atomização ($^{\circ}\text{F}$) antes da descompressão.

- Calor de formação da carepa (Q_{FC})

Utilizou-se a seguinte expressão empírica desenvolvida no Japão e comprovada para o nosso caso através de uma análise teórica

$$Q_{FC} = 1,01 \times 10^6 \times \% \text{ carepa} \times \text{tonelagem horária (kcal/h)} \quad (8)$$

Nesta fórmula, já está descontado o calor absorvido para o aquecimento da carepa.

O calor de entrada (QE) será dado, então, por:

$$QE = Q_{\text{COMB}} + Q_{\text{S COMB}} + Q_{\text{S AR}} + Q_{\text{S VA}} + Q_{\text{FC}} \quad (9)$$

- Calor de saída (QS)

As parcelas que compõem o calor de saída são:

a) calor sensível dos gases queimados (antes do recuperador);

b) calor absorvido pelas placas;

c) calor perdido através das paredes;

d) calor perdido pela água dos skids;

e) outros.

- Calor sensível dos gases queimados (QSGQ)

Devido à impossibilidade de medição de vazão de gases queimados, calculou-se a mesma por estequiometria, determinando-se, por meio de análise química, sua composição, em base seca, no tocante a CO , CO_2 , H_2 e N_2 .

O calor sensível dos gases queimados foi determinado pela equação:

$$\begin{aligned}
 QSCQ = & M_{SO_2} \times H_{SO_2}^T + M_{CO} \times H_{CO}^T + M_{CO_2} \times H_{CO_2}^T + M_{O_2} \times H_{O_2}^T + M_{N_2} \times \\
 & \times H_{N_2}^T + M_{VAPOR} \times H_{VAPOR}^T \quad (\text{kcal/h}) \quad (10)
 \end{aligned}$$

sendo:

M_x - nº de moles do composto x presentes nos gases queimados/h

H_x^T - entalpia do composto x à temperatura T de saída dos gases queimados (antes do recuperador), (kcal/mol).

O vapor presente nos gases queimados é proveniente do ar de combustão, da queima do combustível e do vapor de atomização.

Os valores de entalpia das diferentes substâncias presentes nos gases queimados, em função da temperatura, podem ser vistos no apêndice I.

- Calor absorvido pelas placas ($Q_{AÇO}$)

Esta é, quiçá, a parcela de mais difícil avaliação em vista da existência de um gradiente de temperatura ao longo da espessura e do resfriamento localizado por efeito dos skids.

Foram realizadas algumas experiências para conhecer a temperatura em diferentes pontos do interior das placas.

Com base nestas informações e nos dados provenientes do registro diário de temperatura superficial foi considerada uma temperatura média de 1200°C para os fornos de tiras a quente e de 1150°C para os da linha de chapas grossas.

Portanto a expressão para o cálculo do calor absorvido pelas placas fica:

$$Q_{AÇO} = \text{tonelagem horária} \times H_{AÇO} \times 1000 \quad (11)$$

$H_{AÇO}$ = entalpia do aço à temperatura de desenformamento (kcal/kg).

- Calor perdido através das paredes (QPP)

A figura 1 esquematiza o fluxo de calor numa parede composta, cujas superfícies estão submetidas à temperaturas diferentes.

Neste caso, o fluxo total de calor numa determinada seção é igual ao gradiente térmico total dividido pela soma das resis-

tências térmicas das diversas camadas da parede.

Analicamente, pode-se escrever:

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{N \sum_{i=1} R_i} \quad (12)$$

onde:

Q - fluxo de calor por unidade de área (kcal/m² h)

T₁ - temperatura interna do forno (°C)

T₂ - temperatura externa da parede do forno (°C)

R_i - resistência térmica da camada i (m² h °C/kcal)

N - nº de camadas que compõem a parede.

A resistência térmica de cada camada pode ser calculada pela expressão:

$$R_i = \frac{E_i}{k_i} \quad (13)$$

sendo:

E_i - espessura da camada i (m)

k_i - condutibilidade térmica da camada i (kcal/h m °C).

As perdas de calor pelas paredes foram calculadas individualmente por zona através da equação (12).

Os valores de condutibilidade térmica fornecidas pelos fabricantes e as áreas superficiais das paredes dos fornos podem ser vistos no apêndice II.

O valor do calor total perdido pelas paredes dos fornos (Q_{PP}) é dado pelo somatório das parcelas correspondentes a cada zona.

- Calor perdido pela água dos skids (Q_{PSKID})

Em realidade este calor abrange não somente as perdas pela água dos skids, mas também pela água das colunas do sistema e cross pipes

$$Q_{PSKID} = V_{AS} \times \rho_A \times C_{\text{ÁGUA}} \times (\theta_{\text{ÁGUA}} - \theta_a) \quad (14)$$

onde:

- V_{AS} - vazão da água do skid (m^3/h)
 $C_{\text{ÁGUA}}$ - calor específico da água = $,1 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$
 $\theta_{\text{ÁGUA}}$ - temperatura da água dos skids ($^\circ\text{C}$)
 ρ_A - densidade da água (kg/m^3).

- Outros (QO)

Esta parcela corresponde às perdas difíceis de se quantificar teoricamente devido à complexidade do seu cálculo. Nela se inclui o calor perdido no enforamento e desenforamento das placas, nas aberturas existentes no forno e nas paredes dos canais de fumaça. Ela depende também da distribuição da pressão no interior do forno.

Com o propósito de satisfazer a condição de que o calor de entrada é igual ao calor de saída, o valor de QO foi determinado pela expressão:

$$QO = QE - (QSGQ + Q_{\text{AÇO}} + QPP + QP_{\text{SKID}}) \quad (15)$$

O calor de saída (QS) será dado, então, por:

$$QS = QSGQ + Q_{\text{AÇO}} + QPP + QP_{\text{SKIP}} + QO \quad (16)$$

- Levantamento de Dados e Análise por Computador

Após a realização da análise teórica anteriormente descrita, foi feito o levantamento de dados, o qual envolveu a coleta de aproximadamente 62 dados para cada forno durante uma semana, através de acompanhamentos na área e dos registros diários de operação dos fornos.

Na tabela II, apresenta-se um resumo contendo todos os dados necessários ao cálculo do balanço térmico, para os quatro fornos.

Realizaram-se análises de composição química de BFG, COG, gases queimados e do poder calorífico do óleo em nossos laboratórios. A análise da composição química do óleo combustível foi feita no IPT.

Posteriormente foi desenvolvido um programa de computador em linguagem FORTRAN para o cálculo do balanço térmico e a emis-

são dos resultados na forma de um relatório de tipo gerencial.

Como exemplo, o balanço térmico do forno de reaquecimento de placas para chapas grossas para uma tonelagem horária de 143 t/h e placas de 252mm de espessura está esquematizado na figura 2.

Na tabela III está mostrado o resumo do balanço térmico para os 4 fornos.

Como parâmetros de controle do forno são fornecidos no relatório valores de rendimento teórico e eficiência térmica, calculados a partir das expressões citadas a seguir

$$\text{Rendimento teórico} = \frac{\text{Calor absorvido pelas placas}}{\text{Calor total de entrada}}$$

$$\text{Eficiência térmica} = \frac{\text{Calor absorvido pelas placas}}{\text{Calor de combustão do óleo}}$$

- Análise Comparativa dos Resultados dos 4 Fornos

Os resultados refletem o comportamento mais ou menos esperado dos fornos.

Na tabela III é possível observar as parcelas de calor envolvidas assim como o rendimento teórico e a eficiência térmica.

Estes dois últimos parâmetros são maiores nos fornos tipo Walking Beam, do que nos Pusher, basicamente como consequência do melhor aproveitamento do calor por parte das placas. Para isso são fatores de importância: as menores perdas de calor correspondentes ao item "Outros" e o particular perfil do forno, que facilita a transmissão de calor e a menor incidência de marcas de skids.

No forno 1 da linha de chapas grossas nota-se um exagerado valor do calor perdido pela água dos skids. Tal comportamento pode ser atribuído ao fato de que o recobrimento refratário dos skids não estava, na época, em boas condições.

O calor perdido pelas paredes é inferior àquele indicado pela bibliografia. Isto pode ser devido ao fato de que os valores de condutibilidade dos refratários, fornecidos pelos fabricantes, sejam provavelmente inferiores aos reais.

- Análise de oxigênio no forno

Há uma tendência na siderurgia de se otimizar as condições de combustão através da medição do oxigênio livre. Nesse sentido na USIMINAS serão instalados analisadores baseados em cápsulas de óxido de zircônio.

As informações resultantes destas análises vão possibilitar, não somente a otimização da queima do combustível, mas também permitiriam inferir a composição química dos gases queimados, evitando-se, assim a dispendiosa tarefa de realizar periodicamente as amostragens destes gases e sua análise por cromatografia.

Logicamente os locais de instalação destes aparelhos e as condições em que os mesmos vão interagir com o modelo de balanço térmico devem ser estudados cuidadosamente.

4. CONCLUSÕES

a) Foi desenvolvido um programa em linguagem FORTRAN que permite a rápida realização de balanços térmicos dos fornos de reaquecimento de placas da USIMINAS.

b) O relatório emitido pelo computador permite uma fácil análise do desempenho térmico do forno.

c) Os valores de rendimento teórico e de eficiência térmica podem ser usados como parâmetros básicos para o controle de operação do forno.

d) A comparação dos resultados obtidos em nosso balanço térmico, para uma tonelagem horária de 1252 (chapas grossas) mostra uma boa concordância com aqueles previstos pelo fabricante.

e) É de se destacar que, no caso do forno da linha de chapas grossas, a perda de calor pela água dos skids foi sensivelmente maior que a prevista pelo fabricante.

f) O modelo de cálculo do balanço térmico permite prever o desempenho térmico do forno para distintas condições de operação como, por exemplo, no caso de se usar "hot charge", eliminação de uma ou mais zonas de combustão, temperatura visada de desenformamento mais baixa, etc.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seu agradecimento ao técnico Sérgio Moreira Lameirinhas pela sua colaboração no planejamento e realização da coleta de dados e no processamento dos mesmos.

BIBLIOGRAFIA

1. FISCHER, L.J. ed. Combustion engineers' handbook, George Newnes Limited, London, 1961.
2. KREITH, F. Princípios da transmissão de calor, Edgard Blücher Ltda., S.P., 1973.
3. MENDES, L.G. Balanco térmico do forno contínuo nº 3 da Usiminas. Seminário interno do Centro de Pesquisas, Usiminas, agosto, 1974.
4. SCHUHMANN, R.J. Ingenieria metalurgica. Companhia Editorial Continental S.A., México, Tomo 1, 1968.

APÊNDICE I

Valores de Entalpia (cal/mol) em Função da Temperatura (K)

$$H_T - H_{298} = aT + bT^2 + cT^{-1} + d$$

	O ₂	N ₂	H ₂ O	SO ₂	CO	CO ₂	H ₂
a	7,16	6,83	7,30	11,04	6,79	10,57	6,52
b x 10 ³	0,50	0,45	1,23	0,94	0,49	1,05	0,39
c x 10 ⁻⁵	0,40	0,12	-	1,84	0,11	2,06	-0,12
d	-2313	-2117	-2286	-3992	-2105	-3936	-1938

APÊNDICE II

Áreas superficiais dos fornos Walking Beam, por zona

ZONAS \ LOCAL	TETO		BASE		PAREDE	LATERAL
	F4	F5	F4	F5	SUP.	INF.
PRÉ-AQUECIMENTO	189.0	82.0	187.0	95.0	52.0	55.0
AQUECIMENTO	145.0	92.0	159.0	103.0	33.0	30.0
ENCHARQUE	155.0	125.0	159.0	109.0	35.0	33.0

Áreas superficiais dos fornos Pusher, por zona

ZONAS \ LOCAL	X	TETO	BASE	PAREDE LATERAL
AQUECIMENTO	SUP.	153.0	X	83.0
	INF.	X	138.0	65.0
ENCHARQUE	SUP.	77.0	X	34.0
	INF.	X	49.0	X

Condutibilidades térmicas dos materiais de revestimento

	kcal/h.m.°C
- Bloco alumina 1ª	0.70
- Concreto isolante	0.32
- Silicato de cálcio	0.10
- Vermiculite	0.04
- Fibra cerâmica	0.175
- Tijolo refratário sílico-aluminoso	0.88
- Massa plástica	0.68
- Placa isolante	0.08
- Tijolo isolante	0.20
- Eletro fundido	3.7
- Chapa de aço	43.8

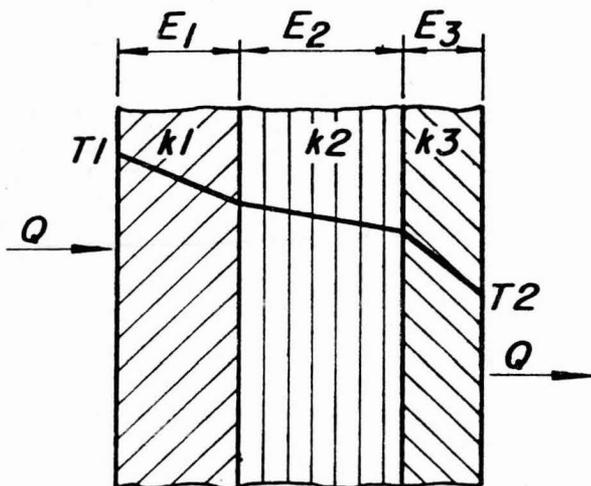


Figura 1 - Fluxo de calor através de uma parede composta.

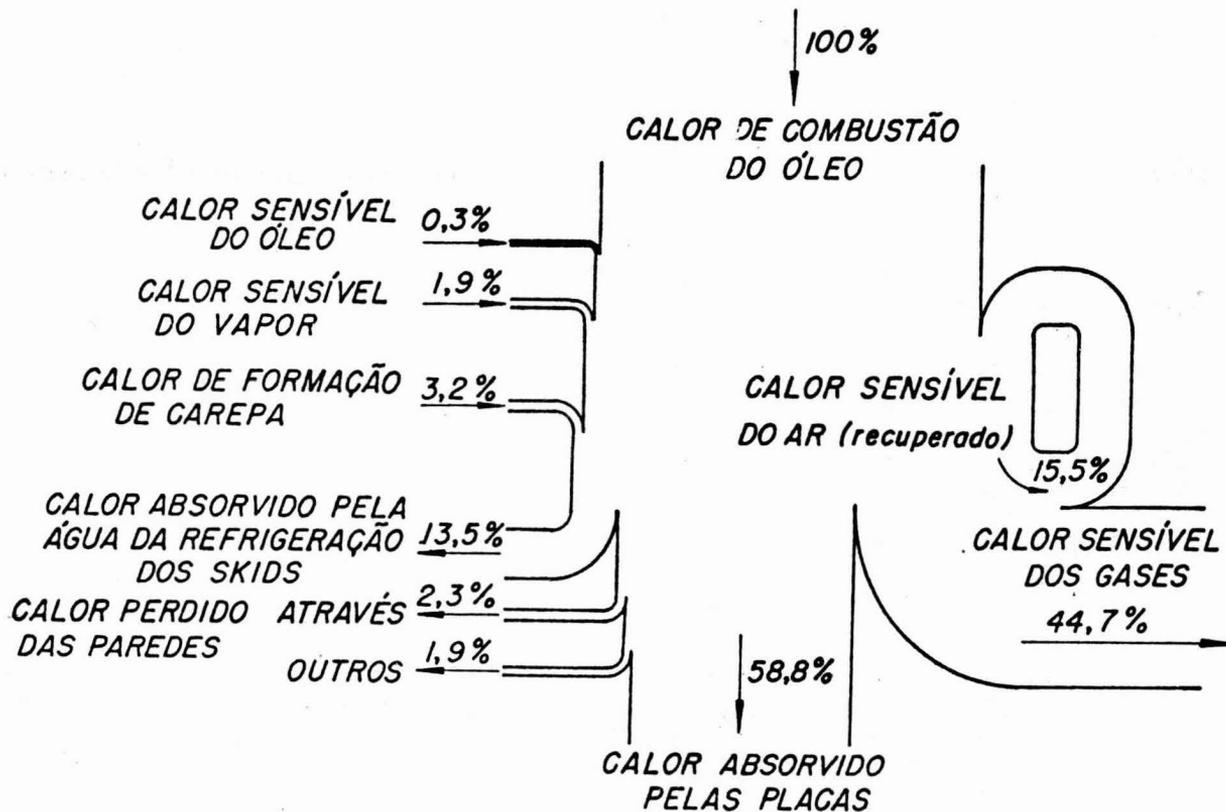


Figura 2 - Balanço térmico do forno Walking Beam (143 t/h - placa de 252mm).

HEAT BALANCE OF THE USIMINAS REHEATING FURNACES

S Y N O P S I S

This paper discusses the heat balance of the slab reheating furnaces of hot rolling line of USIMINAS. Also, mention has been made of their thermal efficiency as well as their theoretical yield.

The procedure is based upon the utilization of a computer model, permitting a rapid evaluation of results for any existing condition, hereby supplying an efficient tool for the furnace control.

TABELA II - Resumo dos valores utilizados no cálculo

VARIÁVEL	VAZÃO DE GÁS MISTO Nm ³								VOL. ÓLEO (1)		RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL								
	LOCAL	TOP			BOTTON			TOP.	BOTTON	TOP.				BOTTON					
ZONAS	FORNO	F2	F3	F4	F2	F3	F4	F5	F5	F2	F3	F4	F5	F2	F3	F4	F5		
Pré-aquecimento	-	-	2950	-	-	3300	1200	1300		0	0	3.8	10	0	0	3.8	11		
Aquecimento	5000	5000	5600	3600	4000	6500	800	800		3.9	3.5	3.75	10	3.0	3.7	3.75	10		
Encharque	2100	2000	2700	-	-	2600	450	400		2.8	2.6	3.5	11	0	0	3.5	10		
VARIÁVEIS	TEMPERATURA °C								OUT. GÁS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA GÁS %									
	LOCAL	TOP.				BOTTON				FORNO	N2	H2	CH4	C2H6	C2H4	CO	CO2	O2	
ZONAS	FORNO	F2	F3	F4	F5	F2	F3	F4	F5	COG	2,3,4	1,7	57,5	27,2	1,3	4,2	5,5	1,8	0,7
Pré-aquecimento	-	-	1010-1090	1100-1180	-	-	1070-1100	1120-1200		BFG	2,3,4	51,8	3,3	0	0	0	22,3	22,6	-
Aquecimento	1230-1300	1230-1300	1200-1290	1220-1280	1210-1290	1200-1290	1240-1320	1200-1280		QUEIMADO	F2	85,1	0,04	0	0	0	0	14,0	0,9
Encharque	1300-1370	1300-1370	1250-1310	1170-1250	-	-	1240-1300	1180-1250			F3	84,7	0,01	0	0	0	0	13,0	2,2
											F4	84,8	0	0	0	0	0	13,6	1,6
											F5	81,9	0	0	0	0	0	14,5	3,6
UMIDADE RELATIVA DO AR = 70% TEMPERATURA AMBIENTE = 25°C																			
TEMP. G.Q. ANTES RECUP.				TEMP. G.Q. DEPOIS RECUP.				TEMP. AR COMBUSTÃO.				TEMPERATURA ÓLEO		VALOR ATOM.		TEMP. ÁGUA SKID			
F2	F3	F4	F5	F2	F3	F4	F5	F2	F3	F4	F5	F5	F5	F2	F3	F4	F5		
910	905	900	990	510	500	495	600	420	410	400	430	950C	1600C	50	48	35	40		
TEMPERATURA EXTERNA				VAZÃO ÁGUA PELO SISTEMA (L/H)				TEMPERATURA DE DESENFORNAMENTO											
ZONAS	FORNO	F2	F3	F4	F5	F2	F3	F4	F5	F2	F3	F4	F5						
Pré-aquecimento	-	-	101	170	155900	152000	286000	300000		1200	1200	1200	1150						
Aquecimento	88	88	110	170	TONELAGEM HORÁRIA				PROFUND. GÁS	F	F2	F3	F4	VALOR DE ATOMI-ZAÇÃO	F5 (Nm ³)				
					F2	F3	F4	F5		COG	1,72	1,72	1,72		VAZÃO	1618			
Encharque	101	91	103	160	88,0	95,0	239,0	143,0		BFG	1,0	1,0	1,0		PRESSÃO	7 atm.			

TABELA III - Resultados do balanço térmico para os 4 fornos

CALORES DE ENTRADA													
ITEM	Nº FORNO	FORNO 2 - PUSHER			FORNO 3 - PUSHER			FORNO 4 - W.B. TO			FORNO 5- W.B. CG		
		KCAL/T /1000	KCAL/H /10000	PERC									
1. Calor de combustão do gás		388.0	3414.2	100.0	369.9	3509.9	100.0	314.9	7546.3	100.0	0.0	0.0	0.0
2. Calor de combustão do óleo		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	312.0	4455.0	100.0
3. Calor sensível do óleo		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	15.6	0.3
4. Calor sensível do ar		54.0	475.2	13.9	50.5	479.7	13.7	45.5	1091.4	14.5	48.4	690.7	15.5
5. Calor de formação da carepa		10.1	88.9	2.6	10.1	95.8	2.7	10.1	242.0	3.2	10.1	144.2	3.2
5. Calor sensível do vapor		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	85.5	1.9
TOTAL		452.1	3978.2	116.5	430.5	4085.4	116.4	370.5	8879.7	117.7	377.5	5391.0	121.0
CALORES DE SAÍDA													
ITEM	Nº FORNO	FOR. 2 TIPO PUSHER			FOR. 3 TIPO PUSHER			FORNO 4 - W. B. TO			FORNO 5 - W. B. CG		
		KCAL/T /1000	KCAL/H /10000	PERC.									
1. Calor absorvido pelas placas		191.3	1683.5	49.3	191.3	1815.7	51.7	191.3	4585.2	60.8	183.3	2618.0	58.8
2. Calor sensível dos gases		168.5	1482.3	43.4	160.4	1522.4	43.4	144.8	3470.5	46.0	139.3	1989.7	44.7
3. Calor perdido através das paredes		8.0	70.8	2.1	7.9	75.0	2.1	6.5	155.2	2.1	7.0	100.2	2.3
4. Calor absorvido pela água de resfriamento dos SKIDS		23.5	207.0	6.1	22.8	216.4	6.2	17.9	429.0	5.7	42.0	600.0	13.5
5. Outros		60.8	534.7	15.7	48.0	455.9	13.0	10.0	239.9	3.2	5.8	83.2	1.9
TOTAL		452.1	3978.2	116.5	430.5	4085.4	116.4	370.5	8879.7	117.7	377.5	5391.0	121.0
RT = $\frac{\text{Calor absorvido pelas placas}}{\text{Calor total de entrada}}$		0.42			0.44			0.52			0.49		
ET = $\frac{\text{Calor absorvido pelas placas}}{\text{Calor de combustão do gás-óleo}}$		0.49			0.52			0.61			0.59		