

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

EDSON LUCAS DE OLIVEIRA

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE UMA VENTANEIRA DE ALTO FORNO,
VISANDO SEU COMPORTAMENTO TÉRMICO E FLUIDODINÂMICO

Guaratinguetá
2012

Edson Lucas de Oliveira

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE UMA VENTANEIRA DE ALTO FORNO,
VISANDO SEU COMPORTAMENTO TÉRMICO E FLUIDODINÂMICO

Trabalho de Graduação apresentado ao
Conselho de Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Faculdade de
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, como parte
dos requisitos para obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci

Guaratinguetá-SP

2012

O482a	<p>Oliveira, Edson Lucas de</p> <p>Análise teórica e experimental de uma ventaneira de alto forno, visando seu comportamento térmico e fluidodinâmico / Edson Lucas de Oliveira – Guaratinguetá : [s.n], 2012.</p> <p>50 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 46</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.</p> <p>Orientador: Prof Dr Luiz Roberto Carrocci</p> <p>1. Siderurgia I. Título</p> <p>CDU 669.1</p>
-------	--

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE UMA VENTANEIRA DE ALTO
FORNO, VISANDO SEU COMPORTAMENTO TÉRMICO E FLUIDODINÂMICO**

EDSON LUCAS DE OLIVEIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Antonio Wagner Forti
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI
Orientador/UNESP-FEG


Prof.ª Dr.ª IVONETE ÁVILA
UNESP-FEG


Prof.ª Dr.ª ELIANA VIEIRA CANETTIERI
UNESP-FEG

Guaratinguetá
2012

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e força nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci pela disponibilidade e incentivo durante a orientação deste trabalho.

Ao diretor da Cecal, Sr Ezio e meu colega de trabalho Conti, por sempre contribuírem com suas valiosas experiências e incentivos expressando um sorriso amigo.

A minha mãe, pelo incentivo de sempre buscar algo melhor.

A Usiminas Cubatão, na figura do Eng. Vinicius, que se disponibilizou a fornecer informações cruciais para o êxito deste estudo.

A todos, meus profundos agradecimentos.

OLIVEIRA, E. L. **Análise teórica e experimental de uma ventaneira de alto forno, visando seu comportamento térmico e fluidodinâmico.** 2012. 50f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

Neste trabalho foi estudado o comportamento térmico e fluidodinâmico do ponto de vista teórico e experimental de uma ventaneira de alto forno. A ventaneira é responsável pela insuflação de ar quente no interior do alto forno. O parâmetro comparado foi a diferença de temperatura de entrada e saída da água de refrigeração. Foram utilizadas correlações para convecção forçada no interior de tubos com adequações para seções não circulares. Com base nos dados operacionais de vazão e cargas térmicas foi possível modelar a ventaneira numericamente e, a partir das temperaturas de parede, calcular as resistências de condução e convecção e em seguida o fluxo de calor através das paredes em contato com a água. A soma dos fluxos de calor por convecção foi aplicada na equação da conservação de energia e a partir dela foi possível determinar a variação de temperatura teórica. Este valor quando comparado ao valor real apresentou variação de 0,2°C. Considerando que as condições de contorno em torno da ventaneira são transitórias e suas câmaras apresentam certa irregularidade de rugosidade e seções podemos considerar o método de estimativa do calor de refrigeração coerente com os parâmetros reais de operação.

PALAVRAS-CHAVE: Ventaneira, Convecção forçada, Alto Forno, Calor de Refrigeração.

OLIVEIRA, E. L. **Theoretical and Experimental Analyses of a Blast Furnace Tuyere, studying its thermal and fluid dynamic behavior.** 2012. 50p. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

In this work, it was studied the thermal and fluid dynamic behavior from theoretical and experimental point of view of a blast furnace tuyere. The tuyere is responsible for the hot air insuflation into the blast furnace. The parameter used in the comparison was the difference between the cooling water inlet and outlet temperatures. There were used forced convection correlations inside circular sections with adequations for non circular sections. Based on operations dates of flux and thermal loads it was possible to model numerically the tuyere, and, since it was obtained the wall temperatures, estimate the conduction and convection resistances and the heat flux through the walls in contact with the water. The total heat fluxes from wall to water were applied to the energy conservation equation where could be estimated the theoretical temperature variation. Compared to the real value, the theoretical value presented a difference of 0,2 °C. Considering that the boundary conditions around the tuyere are transitories and that your channels have some rugosity irregularities we can consider the estimation method for cooling system coherent with the real operational parameters .

KEY-WORDS: Tuyere, Forced Convection, Blast Furnace, Cooling Heat.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2 OBJETIVO GERAL.....	8
2.1 Objetivo Específico.....	8
3 DESENVOLVIMENTO.....	8
3.1 Transferência de Calor.....	8
3.1.1 Condução.....	9
3.1.2 Convecção.....	10
3.1.3 Radiação.....	15
3.2 O Processo Siderúrgico.....	16
3.2.1 A Usina Siderúrgica.....	29
3.2.2.O Alto Forno.....	33
3.2.3 A Ventaneira (Objeto de Estudo)	35
3.3 Metodologia de Cálculo e Obtenção de Resultados.....	38
3.3.1 Dados Coletados.....	38
3.3.2 Modelo Numérico.....	39
3.3.3 Modelo Analítico.....	41
4 DISCUSSÃO.....	44
5 CONCLUSÕES.....	45
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
APÊNDICE A - Planilha de Cálculo do Coeficiente Convectivo.....	47
APÊNDICE B - Planilha de Cálculo das Resistências de Condução e Convecção.....	48

1. INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A ventaneira é um dos elementos mais importantes para um bom desempenho de operação de Alto Forno. Ela é responsável pela insuflação do ar quente no interior do forno.

Muitos custos estão relacionados com a parada do forno para troca de ventaneiras "queimadas" que prejudicam o ritmo da produção bem como o rendimento do forno.

Na situação nacional atual a maior causa dos sucateamentos de ventaneiras é a queima da ponta, onde por excesso de calor externo e/ou falta de refrigeração interna, o material da ponta funde-se e a água de refrigeração vaza no interior do forno, causando sérios problemas com relação ao rendimento do processo de redução e danos ao revestimento refratário do forno.

Tais queimas de ventaneiras estão basicamente relacionadas com dois parâmetros, um operacional e outro construtivo:

- Estabilidade do Alto Forno;
- Projeto da ventaneira.

Neste estudo serão avaliados os parâmetros preponderantes quanto ao projeto da ventaneira de um Alto Forno.

MOTIVAÇÃO

Convivendo diariamente na empresa com o projeto e fabricação, e sendo cada vez mais exigidos tecnicamente pela qualidade e eficiência operacional de ventaneiras para alto fornos, foi oportuna a utilização do trabalho de graduação para motivar o atual estudo com relação aos parâmetros preponderantes no quesito refrigeração de uma ventaneira.

O know-how adquirido no presente estudo poderá ser aplicado em inúmeros modelos de ventaneiras e os resultados poderão ser analisados e confrontados com experiências operacionais relacionados com falhas prematuras por falta de refrigeração ou até mesmo evidenciar problemas inerentes ao forno devido à instabilidades da operação.

2. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do estudo é desenvolver ferramentas de cálculo teórico de modo a permitir a validação e otimização de projetos iniciais de ventaneiras bem como a avaliação de desempenho e eficiência de projetos já consolidados.

2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO

O objetivo específico é através da ferramenta desenvolvida calcular a diferença de temperaturas entre entrada e saída da água de refrigeração de um modelo de ventaneira e comparar este valor com o valor real de operação.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Transferência de Calor (ou calor) é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço.

Como mostrado na figura 1, existem três mecanismos de Transferência de Calor.

Quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido, utilizamos o termo condução para nos referirmos à transferência de calor que ocorrerá através do meio.

Em contraste, o termo convecção se refere à transferência de calor que ocorrerá entre uma superfície e um fluido em movimento quando eles estiverem a diferentes temperaturas. O terceiro mecanismo de transferência de calor é chamado de radiação térmica. Todas as superfícies com temperaturas não nula emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas. Desta forma, na ausência de um meio interposto participante, há transferência de calor líquida, por radiação, entre duas superfícies a diferentes temperaturas.

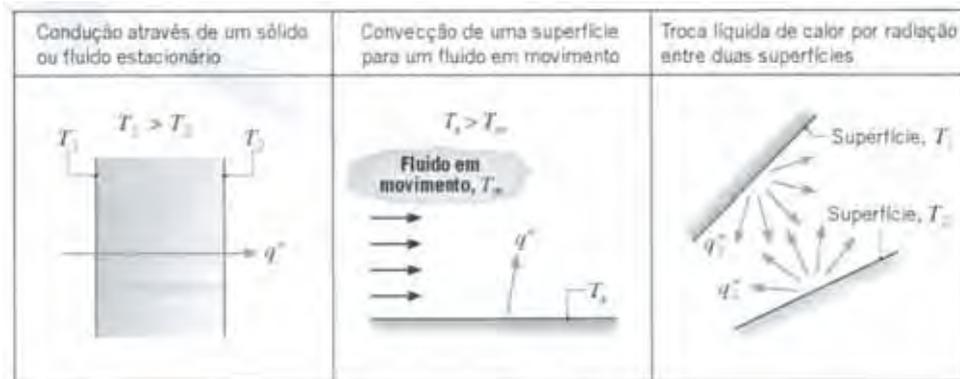


Figura 1 - Mecanismos de Transferência de Calor: condução, convecção e radiação (INCROPERA, DEWITT, 2002).

3.1.1. CONDUÇÃO

Com a menção da palavra condução, devemos imediatamente visualizar conceitos das atividades atômicas e moleculares, pois são processos nesses níveis que mantêm esse mecanismo de transferência de calor. A condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre partículas.

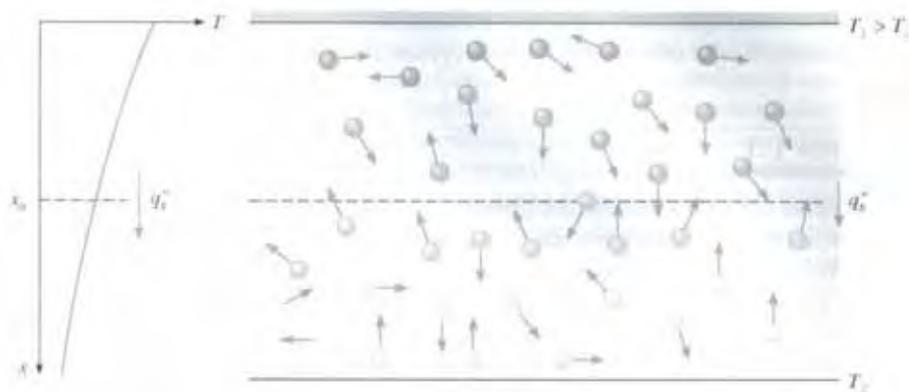


Figura 2 - Associação da transferência de calor por condução à difusão de energia devido à atividade molecular (INCROPERA, DEWITT, 2002).

É possível quantificar processos de transferência de calor em termos de *equações de taxa* apropriadas. Essas equações podem ser utilizadas para calcular a quantidade de energia sendo transferida por unidade de tempo. Para condução térmica, a equação da taxa é conhecida como Lei de Fourier. Para a parede plana unidimensional, mostrada na figura 2 com uma distribuição de temperaturas $T(x)$, a equação da taxa é representada na forma

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

O fluxo de calor q''_x (W/m²) é a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área perpendicular à direção de transferência, sendo proporcional ao gradiente de temperatura dT/dx , nessa direção. A constante de proporcionalidade k é uma propriedade de transporte conhecida como condutividade térmica (W/m.K) e é a característica do material da parede.

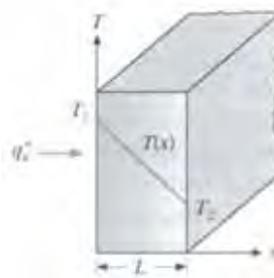


Figura 2 – Transferência de Calor Unidimensional por condução (difusão de energia) (INCROPERA, DEWITT, 2002).

O sinal é negativo é consequência do fato de que o calor é transferido no sentido decrescente da temperatura. Sob condições de regime estacionário mostrada na Figura 2, onde a distribuição de temperaturas é linear, podemos expressar o fluxo de calor por

$$q''_x = k \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2)$$

3.1.2. CONVECÇÃO

O mecanismo de transferência de calor por convecção é composto de dois mecanismos. Além da transferência de calor devido ao movimento aleatório molecular (difusão), a energia também é transferida através do movimento global, ou macroscópico, do fluido. Esse movimento do fluido é associado ao fato de que, em qualquer instante, um grande número de moléculas está se movimentando coletivamente ou na forma de agregados de moléculas. Tal movimento, na presença de um gradiente de temperatura, contribui para a transferência de calor. Uma vez que as moléculas nos agregados mantêm seus movimentos aleatórios, a transferência total de calor é, então, composta pela superposição de transporte de energia

devido ao movimento aleatório das moléculas e pelo transporte devido ao movimento global do fluido. É comum utilizar os termos convecção, quando nos referimos a esse transporte cumulativo, e advecção quando nos referimos ao transporte devido ao movimento global do fluido.

Considerando o escoamento do fluido sobre a superfície aquecida da figura 3. Uma consequência da interação entre fluido-superfície é o desenvolvimento de uma região no fluido através da qual a velocidade varia entre zero, na superfície, e um valor infinito u , associado ao fluxo. Essa região no fluido é conhecida como camada limite hidrodinâmica ou de velocidade. Além disso, se as temperaturas da superfície e do fluido que escoar forem diferentes, existirá uma região do fluido através da qual a temperatura irá variar de T_s em $y=0$ a T_∞ , associada à região do escoamento afastada da superfície. Essa região, conhecida como camada limite térmica, pode ser menor, maior ou ter o mesmo tamanho daquela através da qual a velocidade varia. Em qualquer caso, se $T_s > T_\infty$, ocorrerá transferência de calor por convecção entre a superfície e o fluido.

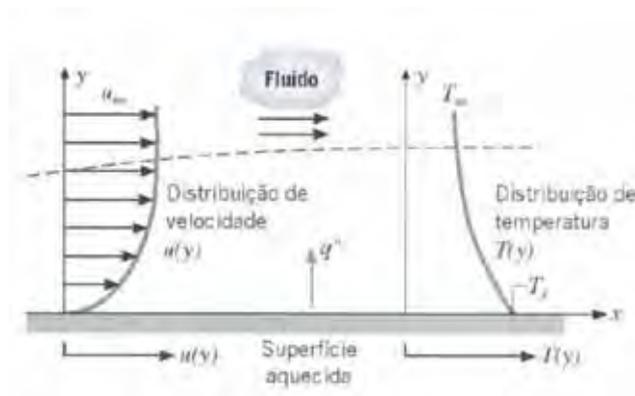


Figura 3 - Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção (INCROPERA, DEWITT, 2002)

A transferência de calor por convecção ocorre tanto em função do movimento quanto pelo movimento global do fluido no interior da camada limite. A contribuição dada pelo movimento molecular (difusão) é dominante próximo à superfície, onde a velocidade do fluido é baixa. De fato, na interface entre a superfície e o fluido ($y=0$), a velocidade do fluido é nula e o calor é transferido somente através desse mecanismo. A contribuição dada pelo movimento global do fluido origina-se no fato de que a espessura da camada limite cresce à medida que o escoamento progride na direção x . Nesse sentido, o calor que é conduzido para o interior dessa camada é “arrastado” na direção do escoamento, sendo eventualmente transferido para o fluido que se encontra no exterior da camada limite.

A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento. Referimo-nos à convecção forçada quando o escoamento é causado por meios externos, tais como um ventilador, uma bomba ou ventos atmosféricos. Em contraste, para convecção natural o escoamento é induzido por forças de empuxo, que são originadas por diferenças de densidade causadas por variações de temperatura no fluido.

Independentemente das características particulares do processo de transferência de calor, a equação apropriada para a taxa de transferência tem a forma

$$q'' = h (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

onde q'' , o fluxo de calor convectivo (W/m^2), é proporcional à diferença de temperaturas da superfície e do fluido, T_s e T_∞ , respectivamente. Essa expressão é conhecida como lei do resfriamento de Newton, e a constante de proporcionalidade h ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) é chamada de coeficiente de transferência de calor por convecção. h depende das condições na camada limite, as quais, pela natureza do movimento do fluido e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido.

Fator de Atrito

Utilizado frequentemente no cálculo de perdas de pressão, o fator de atrito é definido por Moody (INCROPERA, DEWITT, 2002) como

$$f \equiv \frac{-\left(\frac{dp}{dx}\right)D}{\rho u_m^2/2} \quad (4)$$

Para o escoamento laminar, o fator de atrito é definido como

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (5)$$

Para o escoamento turbulento plenamente desenvolvido, uma ampla faixa de números de Reynolds é apresentada no diagrama de Moody (INCROPERA, DEWITT, 2002) da figura 4. Além da dependência do número de Reynolds, o fator de atrito é uma função da condição da superfície do canal. Ele é mínimo para superfícies lisas e cresce com o aumento da rugosidade da superfície, e. Correlações que se aproximam razoavelmente da condição da superfície lisa são da forma

$$f = 0,316Re_D^{-1/4} \quad Re_D \leq 2 \cdot 10^4 \quad (6)$$

$$f = 0,184Re_D^{-1/5} \quad Re_D \geq 2 \cdot 10^4 \quad (7)$$

Alternativamente, uma única correlação que engloba uma faixa ampla de número de Reynolds foi desenvolvida por Petukhov (INCROPERA, DEWITT, 2002) e é da forma

$$f = (0,790 \ln Re_D - 1,64)^{-2} \quad 3000 \leq Re_D \leq 5 \cdot 10^6 \quad (8)$$

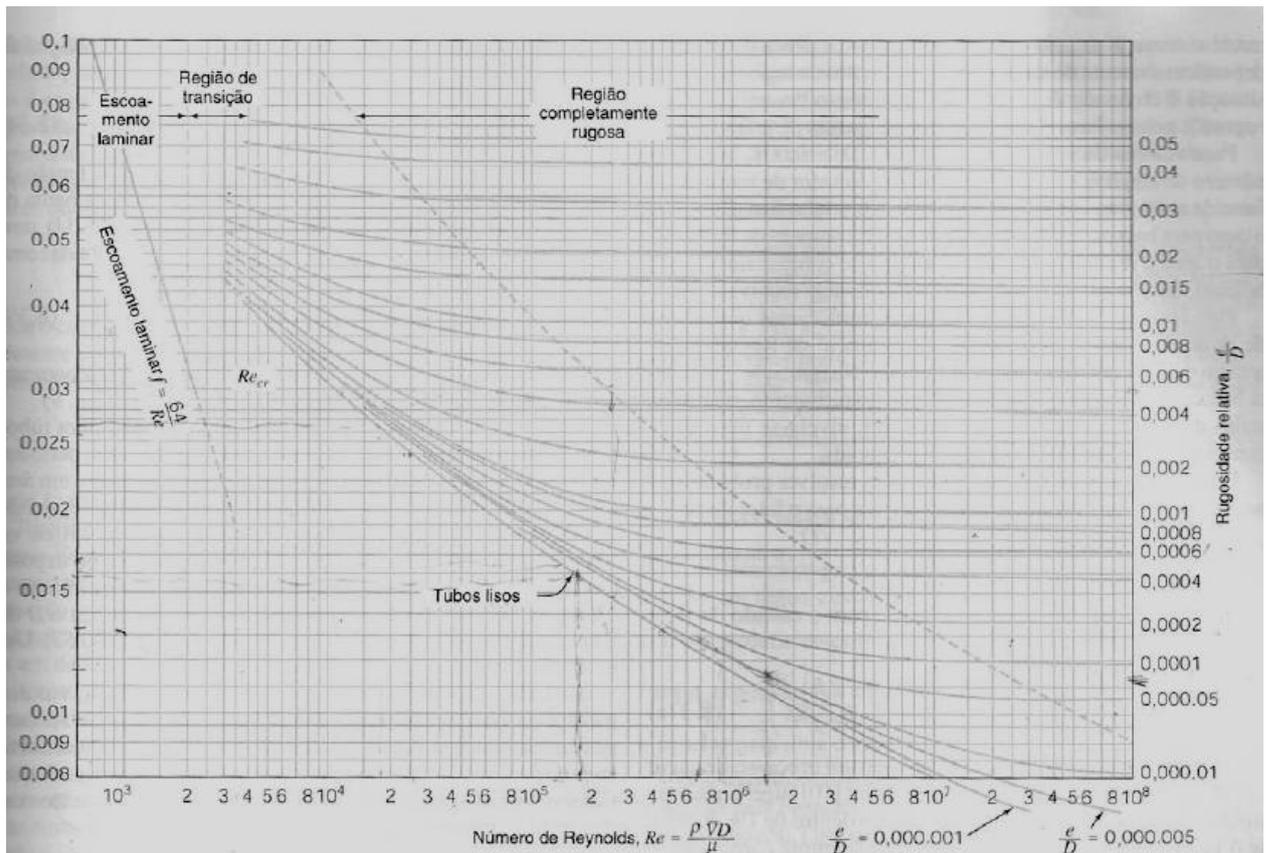


Figura 4 – Diagrama de Moody (FOX, MCDONALD,1998)

Correlações da Convecção

Uma vez que a análise de condições de escoamento turbulento é complicada, grande ênfase é colocada na determinação de correlações empíricas. Uma expressão clássica para o cálculo do Número de Nusselt local para escoamento turbulento plenamente desenvolvido (hidrodinamicamente e termicamente) em um tubo liso circular é devido a Chilton-Colburn (INCROPERA, DEWITT, 2002).

$$\frac{C_f}{2} = \frac{f}{8} = StPr^{2/3} = \frac{Nu_D}{Re_D Pr} Pr^{2/3} \quad (9)$$

Substituindo para o fator de atrito a partir da equação (8), a equação de Colburn é então

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \quad (10)$$

A equação de Dittus-Boelter (INCROPERA, DEWITT, 2002) é ligeiramente diferente, segundo a forma

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n \quad (11)$$

Onde $n = 0,4$ para aquecimento ($T_s > T_m$) e $0,3$ para resfriamento. Essas equações foram confirmadas experimentalmente para a faixa de condições

$$\left[\begin{array}{l} 0,7 \leq Pr \leq 160 \\ Re_D \geq 10000 \\ \frac{L}{D} \geq 10 \end{array} \right]$$

Embora a equação seja facilmente aplicada e certamente satisfatória, erros de até 25% podem resultar de sua utilização. Tal erro pode ser reduzido para menos de 10% através do uso de correlações mais recentes, geralmente mais complexas. Uma correlação que é amplamente utilizada é a correlação atribuída a Petukhov (INCROPERA, DEWITT, 2002)

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) Re_D Pr}{1,07 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (12)$$

Onde o fator de atrito pode ser obtido do diagrama de Moody ou através da equação (8). A correlação é válida para

$$0,5 < Pr < 2000$$

$$10^4 < Re_D < 5 \times 10^6$$

Para obter concordância entre os dados para números de Reynolds menores, Gnielinski (INCROPERA, DEWITT, 2002) modificou a correlação e propôs uma correlação da forma

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re_D - 1000) Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (13)$$

Onde o fator de atrito é novamente dado pela equação (8). A correlação é válida para

$$0,5 < Pr < 2000$$

$$3000 < Re_D < 5 \times 10^6$$

Ao utilizar as equações (12) e (13), as propriedades devem ser avaliadas em T_m

Esta última correlação foi utilizada neste trabalho como ferramenta de cálculo para o número de Nusselt.

Tubos não circulares

Como primeira aproximação, podemos utilizar o diâmetro efetivo como o comprimento característico, denominado diâmetro hidráulico e é definido como

$$D_h \equiv \frac{4A_c}{P} \quad (14)$$

Onde A_c e P são a área da seção transversal ao escoamento e o perímetro molhado, respectivamente.

3.1.3. RADIAÇÃO

Radiação térmica é a energia emitida por toda matéria que se encontra a uma temperatura finita. Embora o enfoque esteja direcionado para radiação emitida por superfícies sólidas, as emissões também podem ocorrer a partir de líquidos e gases. Independentemente da forma da matéria, a emissão pode ser atribuída a mudanças nas configurações dos elétrons que constituem os átomos ou moléculas. A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas (ou, alternativamente, por fótons).

Considerando os processos de transferência por radiação da fig 5. A radiação que é emitida pela superfície tem sua origem na energia térmica da matéria limitada pela superfície, e a taxa na qual a energia é liberada por unidade de área (W/m^2) é denominado poder emissivo E da superfície. Existe um limite superior para o poder emissivo, que é previsto pela lei de Stefan-Boltzmann

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (15)$$

onde T_s é a temperatura absoluta (K) da superfície e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$). Tal superfície a qual se aplica a equação acima é denominada radiador ideal ou corpo negro.

O fluxo de calor emitido por uma superfície real é menor do que o emitido por um corpo negro à mesma temperatura e é dado por

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (16)$$

Onde ε é uma propriedade radiante da superfície denominada emissividade. Com valores na faixa $0 < \varepsilon < 1$, essa propriedade fornece uma medida da capacidade de emissão de energia de uma superfície em relação a um corpo negro. Ela depende fortemente da superfície do material e de seu acabamento.

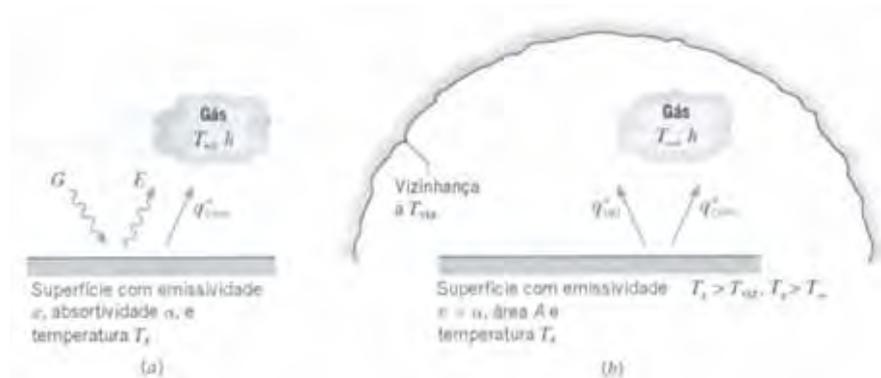


Figura 5 – Transferência por radiação: a) em uma superfície; b) entre uma superfície e uma grande vizinhança (INCROPERA, DEWITT, 2002).

3.2. O PROCESSO SIDERÚRGICO

Os primeiros contatos do homem com o metal ferro foram a partir do ferro meteorítico; em torno de um terço dos meteoritos que atingem a superfície da Terra é de ferro, com teores

variáveis de níquel. Desde tempos remotos o homem os utilizava na fabricação de ferramentas, adornos e armas. Em diversas línguas a palavra que designa o metal ferro tem significado equivalente a "metal que veio do céu".

A metalurgia é o conjunto de tratamentos físicos e químicos a que são submetidos os minerais para a extração dos metais, surgiu há mais de 6 mil anos no Oriente Próximo, e o bronze foi o material metálico predominante no início. De acordo com antigos relatos, o primeiro povo a usar o ferro, sistematicamente, na fabricação de ferramentas e armas foram o chalibas, uma tribo hitita da região onde é a Armênia, que entre 1200 a.C. e 1400 a.C. tinham o monopólio do segredo da fabricação do ferro.

Nos seus 3000 anos oficiais de existência, o processo siderúrgico de transformação do minério de ferro em produtos de aço evoluiu junto com a civilização, mas sua essência ainda é a mesma: usa-se uma fonte de carbono reagindo com um sopro de ar para extrair o ferro do minério e para fornecer a energia necessária ao processo, e o ferro obtido é trabalhado térmica e mecanicamente para obtenção do produto final.

O ferro é um metal de propriedades que apresentam grandes variações, em função de sua composição química e histórico de tratamento termo-mecânico. Em particular, o carbono, sempre presente no ferro devido ao processo de obtenção com o uso de carvão, afeta muitas das propriedades importantes no processo de obtenção e nas características do produto final. A figura 6 mostra o diagrama de equilíbrio ferro-carbono, no qual se pode observar, entre outras importantes características, que o aumento do teor de carbono diminui a temperatura *liquidus*, isto é, a temperatura na qual o metal está totalmente fundido. O ferro puro funde a 1537°C, e o aumento do teor de carbono reduz progressivamente a temperatura de fusão até que, para 4,27% de carbono, atinge-se o mínimo de 1152°C. Para comparação, o cobre funde a 1083°C, e ligas de cobre com estanho (os bronzes) fundem a temperaturas ainda menores, o que facilitou muito o desenvolvimento de artefatos de bronze obtidos por fundição.

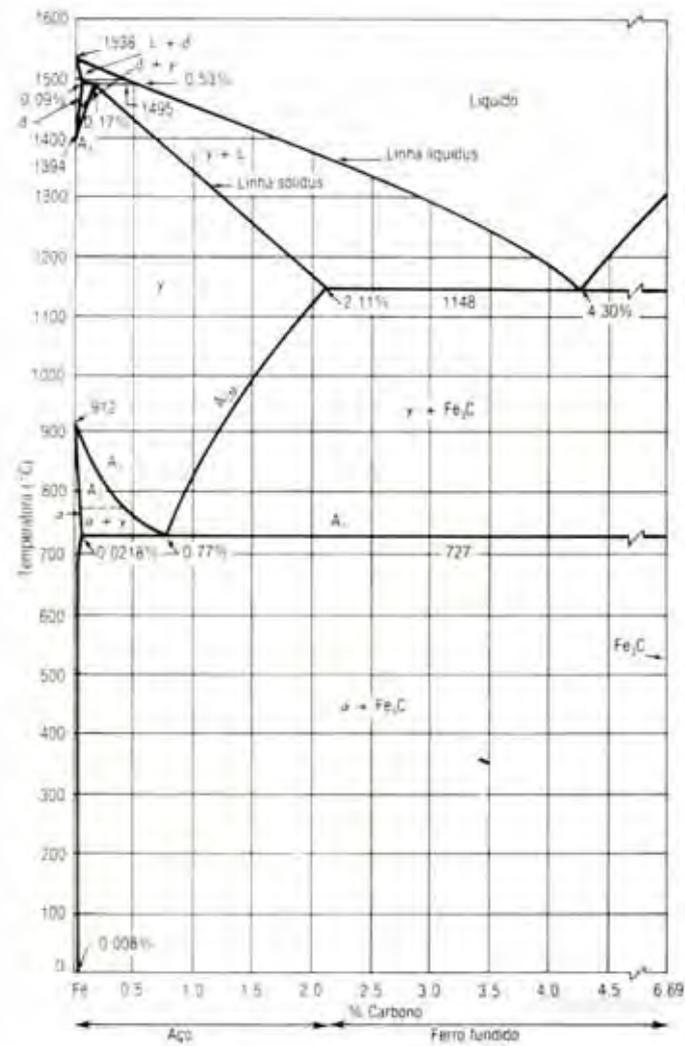


Figura 6 - Diagrama de fase ferro-carbono (SILVA, 1988)

A figura 7 mostra o efeito do teor de carbono e do tratamento térmico na dureza e resistência do ferro. Observa-se que o ferro puro é um material de baixa dureza e resistência, e o aumento do teor de carbono melhora estas propriedades. Ferro contendo acima de 0,32% de carbono, quando aquecido e depois resfriado bruscamente, adquire propriedades mecânicas excepcionais. A descoberta deste fenômeno, e do material assim produzido, que os antigos chamaram de aço, foi decisiva na difusão do ferro como principal metal para fabricação de ferramentas e armas.

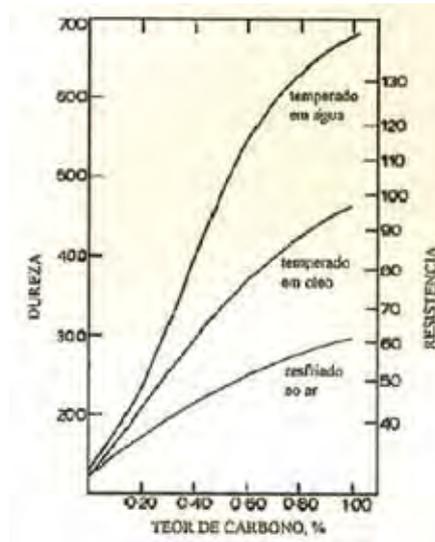


Figura 7 - Efeito do teor de carbono e do tratamento térmico nas propriedades do aço (MOURÃO,2007)

Para se reduzir um óxido de ferro por carbono, são necessárias altas temperaturas e ambiente com pouco oxigênio. Isto pode ser conseguido através de sopro de ar em uma mistura de minério de carvão contida em local isolado da atmosfera.

Descobertas arqueológicas permitiram que fossem identificados diversos tipos de fornos utilizados na redução do minério de ferro. A figura 8 ilustra um dos mais primitivos, que consiste de um buraco revestido com pedras provido de tubos, para injeção de ar na carga, constituída de minério de ferro e carvão vegetal. Dificilmente era possível atingir temperaturas de fusão do ferro nestes tipos de fornos, e obtinha-se ao fundo do poço, após o fim do processo, uma massa de ferro sólido, de baixo teor de carbono, e com a ganga ainda presa na massa metálica. Este material deveria ser re-aquecido e, então, trabalhado nas forjas, para expulsão parcial da escória e para a obtenção do produto final.

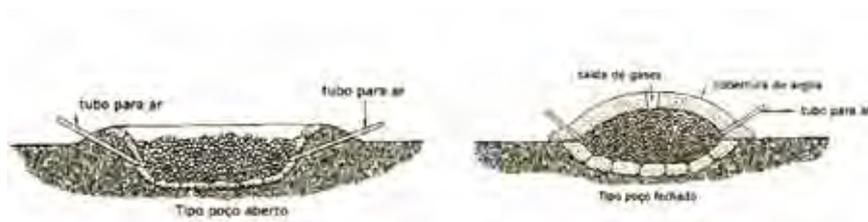


Figura 8 - Fornos antigos de extração de ferro (MOURÃO, 2007)

Este tipo de operação era, então, sujeita a inúmeras variações, com reflexo no produto obtido. O teor de carbono de artefatos de ferro, que a arqueologia datou como tendo sido fabricados entre o XI e o VI séculos antes da era cristã, foi determinado na faixa de zero a 0,8%. De maneira geral, o ferro obtido neste período era ferro doce de baixo carbono e baixa dureza,

obtido em pequenas quantidades nos fornos-poço e usados mais como objeto de decoração e utensílios que não requeriam resistência mecânica. Um exemplo notável de objeto decorativo é a adaga com lâmina de ferro encontrada na tumba de Tutancamon, atada ao cinto da múmia, em lugar de destaque, indicando o grande valor que era dado a estes objetos.



Figura 9 - Adaga com lâmina de ferro (MOURÃO, 2007)

O rei indiano Puru, derrotado por Alexandre, o Grande, apresentou seus respeitos aos vencedores oferecendo-lhe sua espada e uma caixa de ouro contendo um botão de ferro indiano de alto teor de carbono (wootz), à época mais valioso que ouro.

Ao longo dos séculos, o forno de redução foi sendo aperfeiçoado, conforme ilustrado na Figura 10.

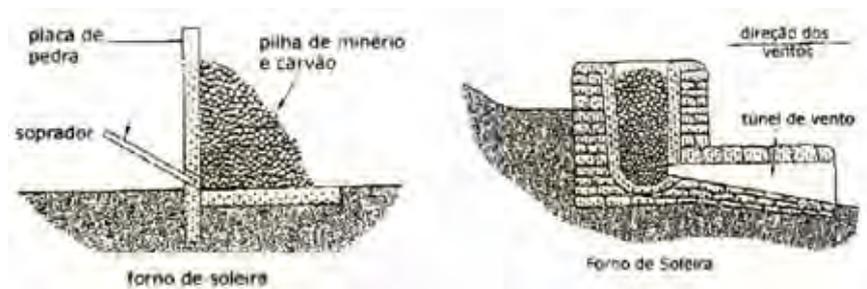


Figura 10 - Versões de fornos de extração de ferros utilizados na antiguidade (MOURÃO, 2007)

Nestes fornos de soleira, com sopro de ar intensificado em relação aos fornos-poço, era possível atingir temperaturas um pouco maiores, permitindo eventualmente a fusão da escória, que era vazada de tempos em tempos, obtendo-se um produto mais limpo. A fabricação de aço por têmpera de ferro com teor de carbono acima de 0,3% passa a ser mais regular a partir do VI século a.C., após a difusão da metalurgia do ferro na Europa, desde o Oriente Médio e

do estabelecimento de centros produtores de armas e ferramentas. Primeiramente, na região onde hoje é a Áustria, posteriormente, deslocando-se pelas terras celtas e para a Espanha, a metalurgia do ferro começou a especializar-se e a crescer em escala. Existem evidências de obtenção de ferro fundido na Antiguidade, com certa regularidade, na China; assim como descobertas esporádicas, na África e Índia, de ruínas de fornos com os quais teria sido possível obter-se ferro-carbono líquido.

A grande contribuição do Império Romano à metalurgia do ferro foi sua organização e o enorme aumento de escala; descobertas arqueológicas indicam que locais de armazenamento de escória deste período podem conter centenas de toneladas, indicando produção em quantidades muito maiores no período pré-romano. A tecnologia de redução permaneceu sem grandes desenvolvimentos, com fornos tipo cuba ou tipo poço (figura 11).

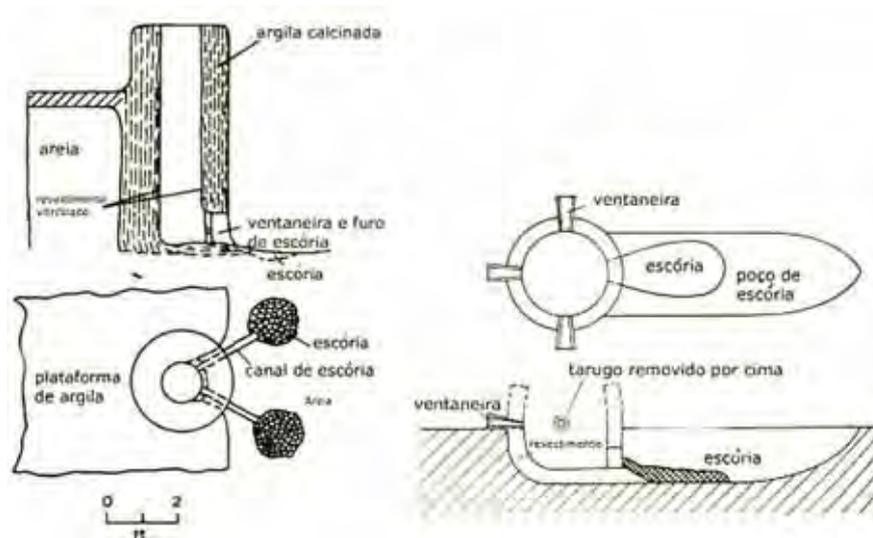


Figura 11 - Fornos de extração de ferro no período romano: à esquerda tipo cuba; à direita tipo poço (MOURÃO, 2007).

Com o tempo foi surgindo uma divisão da indústria em setores: a redução do minério para obtenção dos tarugos de ferro era feita próxima às minas, e o produto intermediário era encaminhado para diferentes forjarias, algumas especializadas (espadas, pontas de lança, pregos), outras generalistas.

O maior exemplo de especialização na fabricação de artefatos de ferro e aço é o da lendária espada de Damasco. Famosas por seu corte afiado e flexibilidade, e, especialmente, por sua beleza em razão dos desenhos formados na superfície por carbonetos o segredo de sua fabricação perdeu-se no tempo. Estudos recentes propõem que a espada de Damasco, na verdade, era fabricada por ferreiros persas a partir de ferro com alto teor de carbono

importado da Índia, o chamado wootz, e comercializado em Damasco. O wootz continha entre 1% e 2% de carbono, e não há certeza sobre o método utilizado em sua obtenção, mas especula-se que possa ter sido pelo método do cadinho a partir de ferro-carbono líquido. O aço de Damasco sempre fascinou os metalurgistas, e seu estudo foi importante no desenvolvimento da metalurgia. Michael Faraday, na tentativa de duplicar o famoso aço, adicionou diferentes metais ao ferro, de certo modo inventando os aços ligados.



Figura 12 - Exemplo de estrutura da superfície de espadas de Damasco (MOURÃO, 2007).

No período medieval após a queda do Império Romano e até o século X da nossa era, houve uma grande diminuição da atividade de mineração e da metalurgia em geral, na Europa e no Oriente Médio, com muito pouco comércio de metais e produção essencialmente local. Surgiram alguns outros centros de produção, como aqueles dos celtas, dos francos, dos nórdicos e dos saxões. Na Índia, a metalurgia do ferro estava bem estabelecida, como testemunha ainda hoje o Pilar de Ferro, datada do ano 300 da era cristã, medindo mais de 7 metros de altura, ilustrada na figura 13.

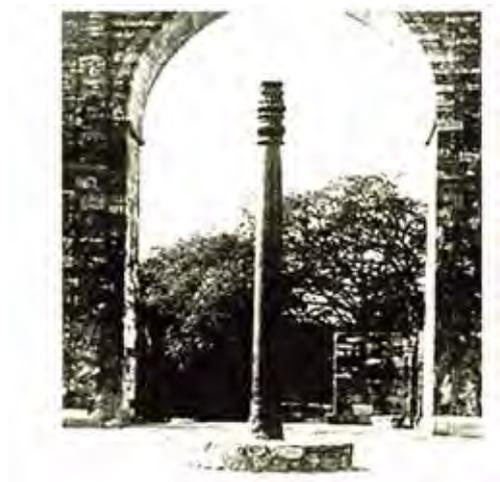


Figura 13 - O Pilar de Ferro (MOURÃO,2007).

Processos de produção começaram a se diferenciar entre as regiões produtoras, e a partir do século X, a quantidade de ferro produzida começou a aumentar. Novas tecnologias surgiram, em geral motivadas pela própria necessidade das forjarias. A principal delas foi o uso de foles acionados por rodas d'água, o que aumentou muito a capacidade de sopro e, assim, a possibilidade de temperaturas maiores serem atingidas. A evolução dos fornos de redução pode ser representada pelos diferentes tipos de fornos surgidos a Idade Média, como a forja Corsa, a forja Catalã, o forno Osmund e o Stückoven (Figura14).

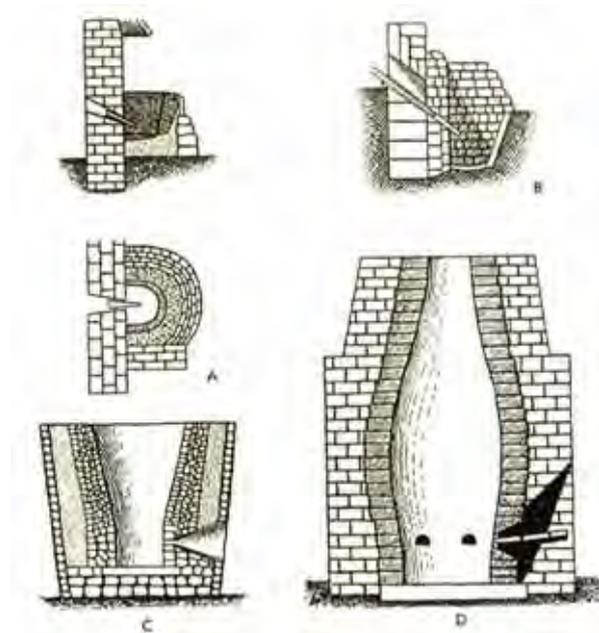


Figura 14 - A) Forja Corsa; B) Forja Catalã; C) Forno *Osmund*; D) Stückoven (MOURÃO, 2007)

Estes processos medievais eram enormes consumidores de carvão e minério, para produções modestas em cada operação. Um forno tipo poço antigo poderia produzir botões de 60 kg consumindo, para isto, em torno de 500kg de minério (com 25% de ferro) e 4500kg de carvão, o que corresponde a um fuel rate assustador de 75000kg C/ton Fe, enquanto para os fornos medievais os valores correspondentes eram:

-Forja Corsa: botões de 125kg, consumindo 330kg de minério e 2850kg de carvão - fuel rate de 22800 kg C/ton Fe

-Forja Catalã: botões de 150kg, consumindo 480kg de minério e 1730kg de carvão - fuel rate de 11500kg C/ton Fe;

- Stückoven: botões de 300 a 900kg, consumindo 2500kg de minério e 6000kg de carvão - fuel rate de 6000kg C/ton Fe

O carvão empregado era obtido por carbonização da madeira em pilhas em fornos de meda, e as quantidades envolvidas já prenunciavam os sérios problemas de abastecimento que diversas regiões da Europa iriam enfrentar. A figura 15 reproduzida de De La Pirotechnia ilustra a fabricação de carvão no século XVI.

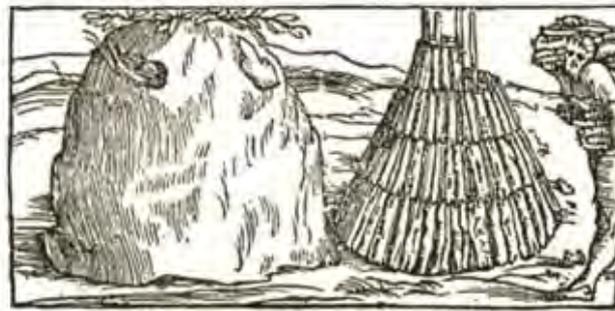


Figura 15 - Fabricação de carvão vegetal no século XVI (MOURÃO, 2007)

O produto obtido por estes processos ainda é um botão de ferro sólido, apesar de ser possível, principalmente com o Stückoven, a obtenção de ferro líquido com alto teor de carbono. Ocorre que o ferro fundido assim obtido, contendo em torno de 4% de carbono, é um material duro, frágil e quebradiço, impossível de ser trabalhado nas forjas, e de pouca versatilidade à época.

A freqüência de guerras requeria melhores armas, e o ferro fundido ganhou, assim, uma aplicação que requeria grandes quantidades de material: canhões e suas respectivas balas. No cerco da cidade de Magdeburg, eram lançadas de 12000 a 16000 balas de canhão de ferro fundido a cada dia, e a produção de ferro atingiu cerca de 60000 toneladas em 1500.

O desenvolvimento do alto forno veio quase naturalmente, motivado pela necessidade do produto, ferro fundido. O primeiro alto forno europeu foi o de Brascia, em 1450 (Figura 16). No fim da Idade Média, o comércio de ferro e aço estava plenamente difundido, e diferentes tecnologias coexistiam, tanto para a extração do ferro como para a obtenção do aço.

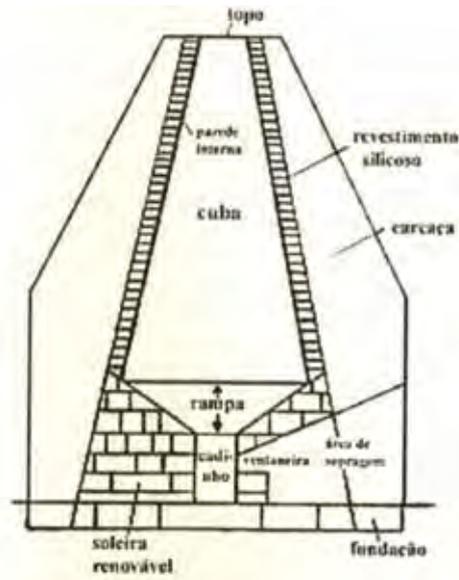


Figura 16 - Representação esquemática do alto forno de Brescia (MOURÃO, 2007).

No entanto, a escassez de madeira para fabricação de carvão vegetal, o combustível e redutor empregado nos altos fornos, impedia uma expansão maior. Madeira era o mais importante material tanto para construção de casas e navios como para o uso industrial, e leis restritivas a seu uso foram editadas em localidades que já sofriam grande devastação, o que fez que houvesse declínio na atividade siderúrgica inglesa, enquanto a Suécia surgia como grande produtora.

Entre 1500 e 1700, a produção dos Stückoven cresceu de 1200-1300kg/dia para 1800-2100kg/dia, com um consumo de carvão de, aproximadamente, o dobro da produção de ferro, e no fim do século XVIII, já se produziam 2000-2500 kg/dia, com consumo de carvão bem menor; esta melhoria foi conseguida basicamente pela adoção do processo contínuo.

A fabricação de aço entre 1500 e 1700 era feita ou por cementação em caixa de ferro doce obtido nas forjas, ou também, por imersão em barras de ferro doce em ferro fundido, de modo a aumentar o teor de carbono. Estes processos conviveram por muito tempo. No período entre os séculos XVI e XVIII, não houve nenhum desenvolvimento revolucionário, mas houve uma melhora significativa dos processos existentes e uma difusão da indústria para diferentes regiões, inclusive, para as colônias inglesas no Novo Mundo.

Em 1708, o cervejeiro Abraham Darby fez experiências com carvão fóssil no intuito de substituir o carvão vegetal, como combustível, e obteve um produto de boa resistência mecânica que não liberava alcatrão, o coque. A difusão do coque como combustível e redutor siderúrgico foi lenta, tendo coque vegetal e antracito convivido durante os séculos

XVIII e XIX, na alimentação dos altos fornos, apesar das grandes vantagens da operação com coque. O maior problema foi que o ferro gusa obtido nos fornos a coque era considerado desfavorável para conversão em ferro doce, em razão das impurezas introduzidas pelo coque. Ferro doce forjado era, ainda no início do século XIX, o principal produto de ferro. O problema foi resolvido com o desenvolvimento, por Henry Cort, do processo de pudlagem, que consiste basicamente em agitar o ferro gusa líquido na soleira de um forno revérbero, adicionando minério de ferro, de modo a oxidar carbono do gusa pelo oxigênio ao ar ou do minério, até este se tornar ferro maleável. O processo difundiu-se rapidamente, aumentando muito a demanda por gusa de alto fornos. Também o processo de cadinho para a produção de aço no estado líquido para fundição, a partir de ferro doce, portanto, de maior homogeneidade e pureza, desenvolvido por Huntsman no fim do século XVIII, fio de grande importância da difusão do aço como material superior ao ferro forjado.

Durante o século XVIII, os equipamentos de sopro evoluíram bastante; tubos de madeira foram substituídos por tubos de ferro, e em 1769 as rodas d'água foram substituídas por motores a vapor. Com estas melhorias, os fornos que produziam em média 1 tonelada/dia, no início do século, passaram a produzir entre 3 e 5 toneladas/dia, no fim do século. O primeiro uso de máquinas a vapor, para sopro de ar para a produção de ferro, deu-se em 1776, quando J. Wilkison produziu os primeiros cilindros de ferro fundido com precisão suficiente para impedir vazamentos de vapor.

Outra tecnologia importante que se tornou disponível no século XIX foi o preaquecimento do ar injetado no forno. O primeiro equipamento de preaquecimento de ar, desenvolvido em 1828 por Neilson, na Escócia, era uma caixa de ferro aquecida externamente. Esta tecnologia difundiu-se com rapidez, e diferentes tipos de preaquecedores foram desenvolvidos. Paralelamente, as ventaneiras tiveram de ser adaptadas ao ar quente, e foram desenvolvidas as ventaneiras de cobre refrigeradas a água. O uso de ar quente resultou em grande aumento na produção dos altos fornos e uma grande diminuição no consumo de combustível.

Com a descoberta de minérios de ferro de alta qualidade na Pensilvânia, Estados Unidos, a siderurgia começou a expandir-se rapidamente na região. Inicialmente ainda baseados em carvão vegetal, os altos fornos incorporavam os últimos desenvolvimentos e outros eram criados, como uso de tijolos refratários no lugar de pedras naturais no revestimento interno; aumento do número de ventaneiras; da altura dos fornos, chegando a 13,7 metros de altura de cuba; topo de forno fechado (até então o topo era aberto), com equipamentos de topo cada vez

mais eficientes, até o desenvolvimento do topo com cone invertido; e, finalmente, melhorias na casa de corrida, com furo de gusa oposto ao furo de escória, para poder dar conta de cada vez maior produção diária de cada forno. Ao longo do tempo, o coque foi tomando o lugar do carvão vegetal, também, nos Estados Unidos.

O fim do século XIX foi marcado por um grande aumento na produção mundial de aço, com o desenvolvimento de processos revolucionários de conversão de gusa. O americano William Kelly percebeu que o carbono do gusa podia ser “queimado” com ar, aumentando a temperatura e diminuindo o teor de carbono até converter-se em aço. Concomitantemente, o inglês Henry Bessemer trabalhou na mesma linha e patenteou o processo (figura 17). Apesar da dificuldade de tratar gusa com teores elevados de fósforo, o processo prosperou e foi adotado por diversos fabricantes europeus.

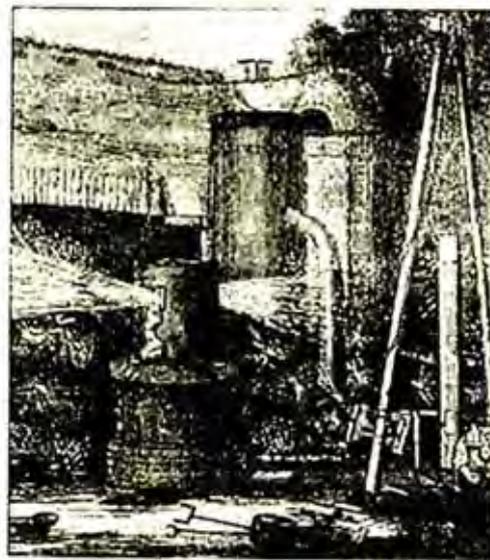


Figura 17 – Primeira experiências do Conversor Bessemer (MOURÃO, 2007).

Na mesma época, Siemens desenvolveu o forno regenerativo de soleira aberta, e Martin aperfeiçoou o processo com o uso de sucata de ferro. O inglês Sidney Gilchrist Thomas resolveu o problema do fósforo nos conversores Bessemer pelo uso de revestimento básico. De 1870 a 1900, a produção mundial de aço aumentou 56 vezes, chegando a 28 milhões de toneladas na virada do século. Grande parte do aço era usado na construção de ferrovias, mas outros mercados eram abertos, como na fabricação de caldeiras, navios, construção civil, pontes. O grande monumento a esta época é a Torre Eiffel, construída em 1889 de aço produzido pelo processo Siemens-Martin. Neste mesmo ano, os Estados Unidos tornaram-se

os maiores produtores mundiais de aço. No fim do século XIX, tanto na Europa como nos Estados Unidos, a indústria siderúrgica operava grandes alto fornos de mais de 20 metros de altura, produzindo em torno de 180 toneladas/dia. O ferro gusa era convertido a aço ou pelo processo pneumático (Bessemer ou Thomas), ou pelo processo de soleira aberta (Siemens-Martin). O processo Siemens-Martin era mais flexível em termos do teor de fósforo do gusa e permitia o emprego de maior quantidade de sucata, e, a partir dos primeiros anos do século XX, tornou-se o processo dominante de conversão de ferro gusa em aço.

O princípio regenerativo para aquecimento de ar foi aplicado por um associado de Siemens, E.A. Cowper, no desenvolvimento dos regeneradores duplos, um em aquecimento pela queima do gás do alto-forno, enquanto o outro preaquece o ar. Conseguiu temperaturas de 620°C no ar, com 20% de economia de combustível no alto-forno.

Durante as primeiras décadas do século XX, os desenvolvimentos do alto forno foram basicamente melhorias no equipamento e no processo que já era bem estabelecido, porém grandes avanços foram registrados na preparação do minério de ferro. Em 1910, na Pensilvânia, foi instalada a primeira máquina Dwight-Lloyd de sinterização direcionada para minério de ferro; os primeiros sínteres eram ácidos, mas, a partir do meados do século XX, passaram a ser utilizados sínteres básicos, com conseqüente economia de combustível no alto forno, que não mais necessitava calcinar o calcário. O processo de pelotização, compreendendo a formação de pelotas a partir de finos de minérios úmidos, seguida de queima destas pelotas, foi desenvolvido na primeira metade do século passado, disseminando-se a partir da década de 1950, para tornar-se hoje, a pelota uma das formas mais importantes de comercialização de minério de ferro.

Outro desenvolvimento decisivo ocorrido no século XX foi a injeção de combustíveis pelas ventaneiras dos altos fornos. Esta prática começou a disseminar-se a partir da década de 1940, quando se percebeu que a injeção de óleo combustível pelas ventaneiras poderia levar à significativa economia do coque carregado pelo topo. A injeção de carvão e, posteriormente, a de gás natural foram testadas e aprovadas e, na atualidade, praticamente todos os grandes alto fornos empregam algum tipo de injeção de combustível pelas ventaneiras.

Na década de 1970, o Japão passou por uma grande modernização de sua siderurgia, e um programa nacional promoveu a substituição de inúmeros alto fornos por outros mais modernos e maiores. Aproveitou-se a desativação de vários altos fornos para uma experiência em grande escala de dissecação dos altos fornos a serem desativados, o que levou a

”descoberta” da chamada zona coesiva, a região com material semifundido, através da qual os gases fluem apenas pelas “janelas” de coque, o que mudou radicalmente a maneira de se pensar sobre o fluxo de materiais no alto forno.

Um moderno alto forno, hoje, pode produzir 13000 toneladas de ferro gusa de qualidade estável por dia, tem vida útil em média próxima a 15 anos, alta produtividade e baixo consumo de combustível (entre 470 e 500kg de coque mais combustível injetado).

2.2.1. A USINA SIDERÚRGICA

As usinas siderúrgicas atuais podem ser divididas em dois grandes grupos: usinas integradas e usinas semi-integradas. Usina integrada é aquela cujo aço é obtido a partir de ferro primário, isto é, a matéria prima é o minério de ferro, que é transformado em ferro na própria usina, nos altos fornos; o produto dos altos fornos, chamado ferro gusa, é transformado em aço através da operação de conversão. A Usina semi-integrada é aquela cujo aço é obtido a partir de ferro secundário, isto é, a matéria prima é sucata de aço, não havendo necessidade da etapa de redução do minério de ferro. A sucata é transformada novamente em aço comercial, por meio do emprego de fornos elétricos de fusão; são recicladoras de aço.

Em uma moderna usina siderúrgica integrada, o processo que vai das matérias primas ao produto final é constituído pelas seguintes etapas principais: extração do ferro de seu minério nos altos fornos; a conversão do ferro gusa, produto intermediário, em aço; o lingotamento do aço líquido de forma a solidificar em forma conveniente para as operações seguintes; e, finalmente, a conformação do metal na forma de produto. Em siderúrgica semi-integrada, o processo começa com a fusão de sucata de aço em forno elétrico a arco, e depois segue basicamente o mesmo procedimento das integradas. A figura 18 apresenta um fluxograma simplificado do processo siderúrgico.

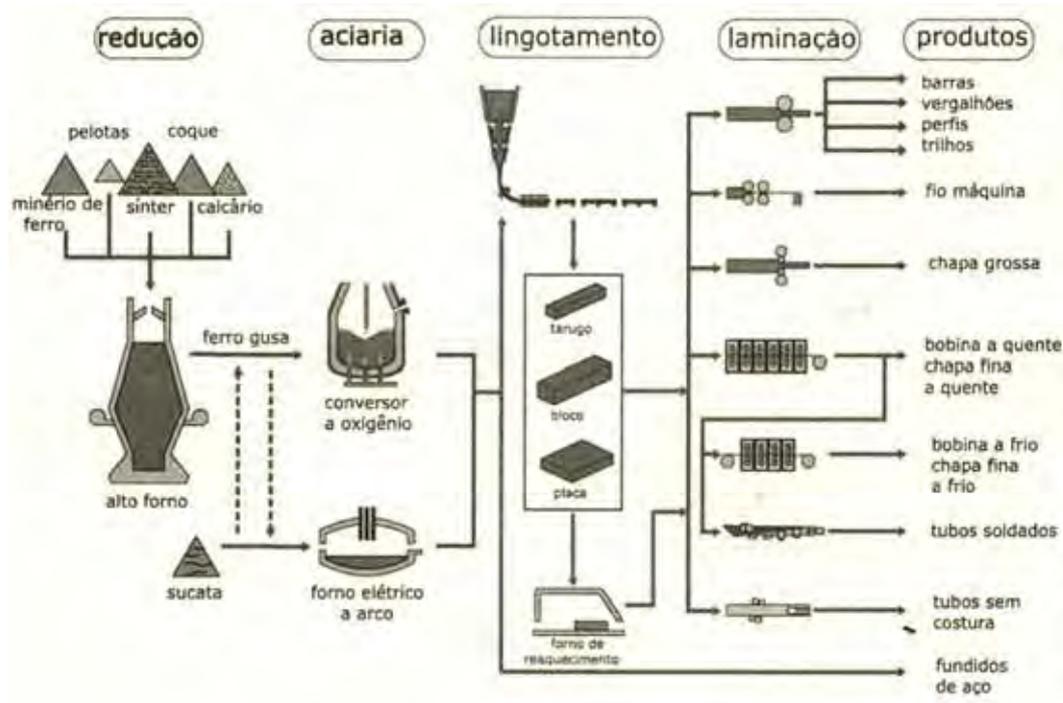


Figura 18 – Fluxograma simplificado do processo siderúrgico (MOURÃO, 2007).

As matérias primas básicas do processo são minério de ferro, carvão mineral e calcário, mas muitos outros insumos e utilidades são empregados.

O processo siderúrgico começa fora da usina com a seleção, compra e transporte de todos os materiais necessários. O primeiro passo é dispor os minérios de ferro e os carvões minerais em pilhas no pátio de matérias primas, junto dos sistemas de transporte, que têm a função de encaminhar estes materiais aos locais de seu processamento.

Procuram-se otimizar as misturas de minérios de ferro, como também a dos carvões minerais, objetivando menor custo com a melhor qualidade possível. Essa fase é feita através da formação de pilhas, com os minérios e os carvões dispostos em camadas horizontais em suas pilhas respectivas, com o auxílio de um “stacker”. Essas pilhas têm um volume de material que poderia alimentar a produção por vários dias.

Após a pilha estar concluída, e com o objetivo de não haver segregação na pilha, o material é recuperado por cortes transversais, utilizando o *reclaimer*, que envia esse material para a sinterização, no caso de minérios, ou para a coqueria, no caso dos carvões minerais.

A sinterização é um processo de aglomeração dos minérios de ferro que emprega o chamado *sinter feed*, minério com granulometria entre 0,1 a 9,5mm. O processo é feito em uma máquina de esteira rolante onde se deposita o minério de ferro e finos de coque ou carvão,

formando camada de aproximadamente 700mm de altura por 2000mm de largura, a qual é aquecida por uma frente de combustão, alimentada por ar succionado através da camada, que percorre da superfície até o fundo da camada ocasionando uma ligação incipiente que produzirá o colamento entre as partículas de minério de ferro, resultando o sinter.

A mistura de carvões é enviada à coqueria, onde sofrerá o processo de coqueificação, resultando o coque. Como subprodutos, têm-se substancia carboquímicas, que são purificadas e vendidas (importante para o baixo custo dos carvões), e o gás de coqueria (GCO), que é utilizado na usina como combustível complementar do balanço energético da usina.

Tanto o sinter como o coque são enviados para silos, processo denominado silagem. Estes silos têm sistemas dosadores, importantes na formulação da carga do alto forno.

O alto forno é um reator cilíndrico vertical que trabalha a contra corrente, ou seja, a carga a ser reduzida carbotermicamente entra pelo topo, e os gases redutores sobem da base para o topo do forno, mantido em regime permanente. Esse forno tem dimensões da ordem de 10 a 14m de diâmetro por 60 a 70m de altura. Necessita de alguns equipamentos auxiliares, tais como: regeneradores, de 3 a 4 por alto forno, que têm como objetivo recuperar o calor dos gases que saem do topo do alto forno, aquecendo o ar que vai ser injetado no próprio alto forno; turbo soprador, que é uma turbina multiestágio capaz de produzir alta vazão a pressões elevadas (cerca de 6kgf/cm²); sistema de limpeza de gases, muito importante para evitar o entupimento das tubulações e regeneradores, em razão da quantidade elevada de particulados nos gases de saída dos alto fornos.

A aciaria é o setor da usina siderúrgica onde o gusa é refinado, obtendo-se o aço. O processo consagrado nas usinas integradas, atualmente, é a conversão do gusa pelo processo a oxigênio, ou processo LD, no qual o gusa é oxidado, controladamente, por um fluxo de oxigênio lançado diretamente à superfície do banho, através de uma lança, por onde o fluxo de oxigênio atinge velocidades supersônicas.

Atualmente, nas aciarias é que se encontram os processos mais flexíveis de conseguir aços com qualidades competitivas com aquelas de aços fabricados por aciarias de pequeno porte, que utilizam sucata e fornos elétricos a arco. Para que isso aconteça, as aciarias foram aprimorando tecnologias de metalurgia de panela (refino secundário), como: injeção de pós-reativos; forno RH, para tratamento do aço à vácuo etc; todas essas tecnologias objetivam

minimizar inclusões, homogeneizar o aço, descarburar o aço até teores de ppm; em resumo, produzir o aço com alto nível de pureza.

Uma grande conquista do setor de aciaria é o lingotamento contínuo que, além de minimizar problemas de superfície dos lingotes, já apresenta uma geometria de placa pronta para a laminação, sem passar pelo processo de laminação de desbaste. No processo anterior, o aço produzido era solidificado em lingoteiras de ferro fundido, resultado em lingotes de até 20t, nas mais variadas formas geométricas. Neste processo, havia a necessidade de reaquecer os lingotes e realizar a laminação de desbaste, obtendo-se a placa, que é matéria prima para os processos de conformação por laminação. No lingotamento contínuo a placa é obtida diretamente no processo.

A placa obtida no lingotamento contínuo é um produto intermediário, que pode ser vendido no mercado nacional e internacional, ou processado na própria usina. É a matéria prima de duas classes de produtos comerciais: chapas grossas (espessura maior do que 6mm) e chapas finas (espessura menor do que 6mm).

Para fabricação de chapas grossas, a placa após o reaquecimento em forno de placa é encaminhada ao laminador de chapas grossas onde sofre o processo de deformação, chegando às dimensões requeridas. O próximo passo pode ser o tratamento térmico (normalização, recozimento ou têmpera), chegando-se ao produto final chapa grossa tratada termicamente ou então chapa grossa sem tratamento térmico.

Para a fabricação de chapas ou tiras finas e bobinas, a placa é encaminhada para a laminação de chapas finas. O primeiro passo é o aquecimento das placas, em forno de reaquecimento, posteriormente essa placa é encaminhada ao trem de laminação a quente, do qual obtém-se o produto "tira a quente", que é um produto comercial, após passar pela laminação de acabamento.

A tira a quente pode seguir para decapagem (tratamento químico superficial), ao invés da laminação de acabamento. Após a decapagem e secagem da tira, ela é encaminhada ao trem de tiras a frio, obtendo-se a tira a frio, que é recozida, sofrendo em seguida a laminação de encruamento, obtendo-se a "tira fina a frio" que é um dos produtos ao qual se incorporou o maior valor agregado de toda a linha de laminados.

3.2.2. O ALTO FORNO

O interior do Alto Forno é dividido em 5 partes:

- Garganta - Onde a superfície superior da carga está localizada;
- Cuba - Onde o minério é aquecido e a redução começa;
- Rampa Paralela juntamente com;
- Rampa - Onde a redução é finalizada e o minério é fundido e gotejado;
- Cadinho - Onde o material fundido é coletado e conduzido através do Furo de Escória.

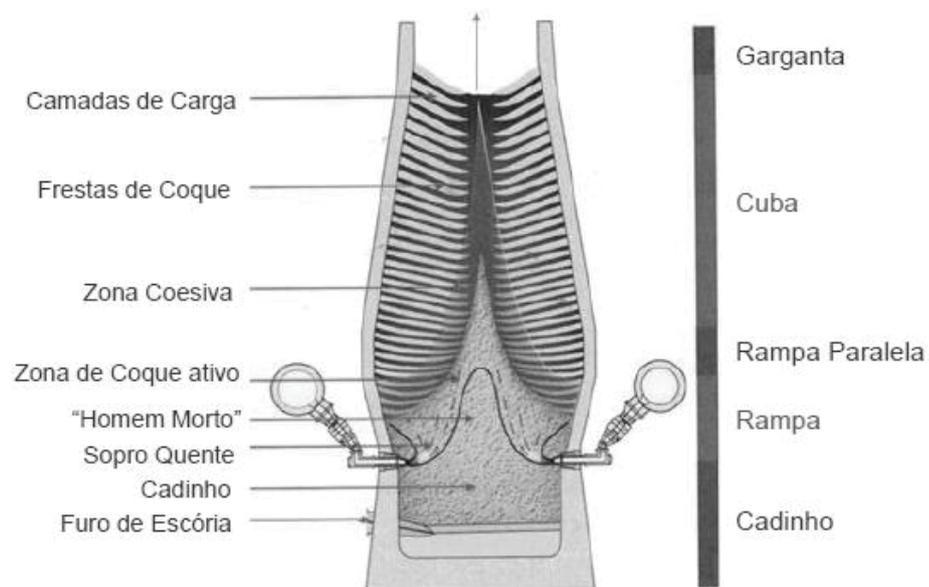


Figura 19 - Divisão de Zonas no Alto Forno (GEERDES, 2009).

Força Motriz de um Alto Forno

O Alto Forno pode ser considerado um trocador de calor e de massa de contra corrente. Ao passo que o calor é transferido do gás para a carga e o oxigênio da carga para o gás, o gás é ascendido enquanto a carga e o coque são descendidos através do forno. Este efeito contra corrente fornece ao processo geral uma ótima eficiência.

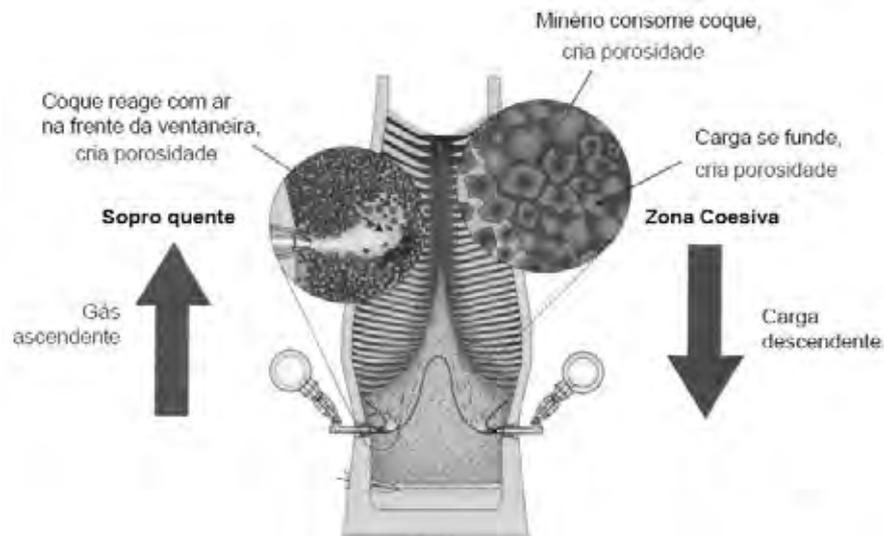


Figura 20 - Força Motriz de um Alto Forno: o processo de contra corrente produz lacunas permitindo a descendência da carga (GEERDES, 2009).

Um exemplo típico de perfil de temperatura no Alto Forno é mostrado na Figura 21. Podemos evidenciar que a zona de amolecimento (5) / derretimento (7) está localizada em uma área onde as temperaturas estão entre 1100 e 1450°C.

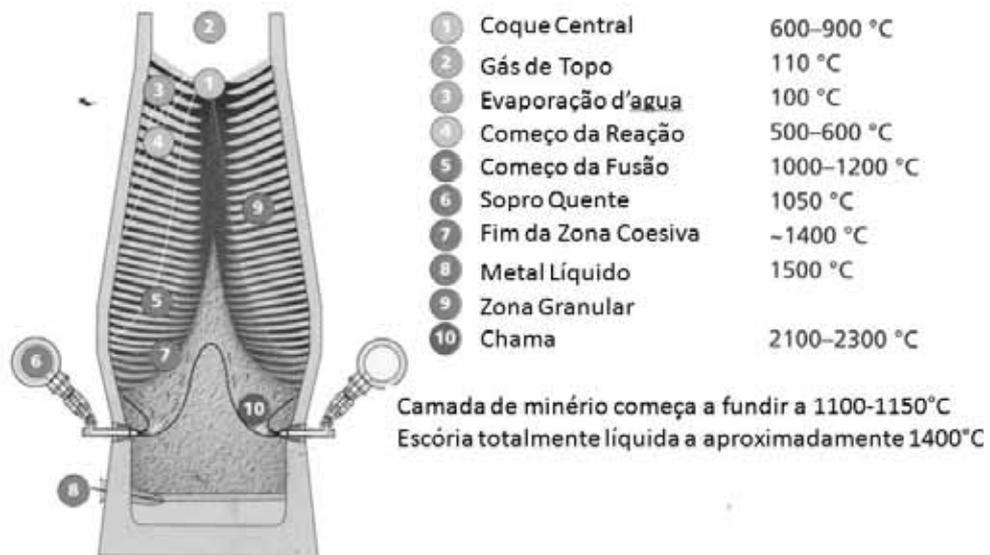


Figura 21 - Perfil de Temperatura em um Alto Forno (GEERDES, 2009).

3.2.3 A VENTANEIRA (OBJETO DE ESTUDO)

A ventaneira é o elemento responsável pela introdução da energia necessária para a realização da redução do minério de ferro. É composta de um tronco de cone cilíndrico oco com um orifício na parte central por onde o ar quente atravessa.

Modelo Físico

É provida de alguns revestimentos anti abrasivos e de isolamento térmico:

- 1 - Revestimento Duro Externo a base de Níquel-Cromo ($k=9,8\text{W/m.K.}$);
- 2 - Revestimento Cerâmico Externo a base de Óxidos de Alumínio ($k=2,63\text{W/m.K.}$);
- 3 - Revestimento Cerâmico Interno a base de Carbetos de Silício ($k=19\text{W/m.K.}$);

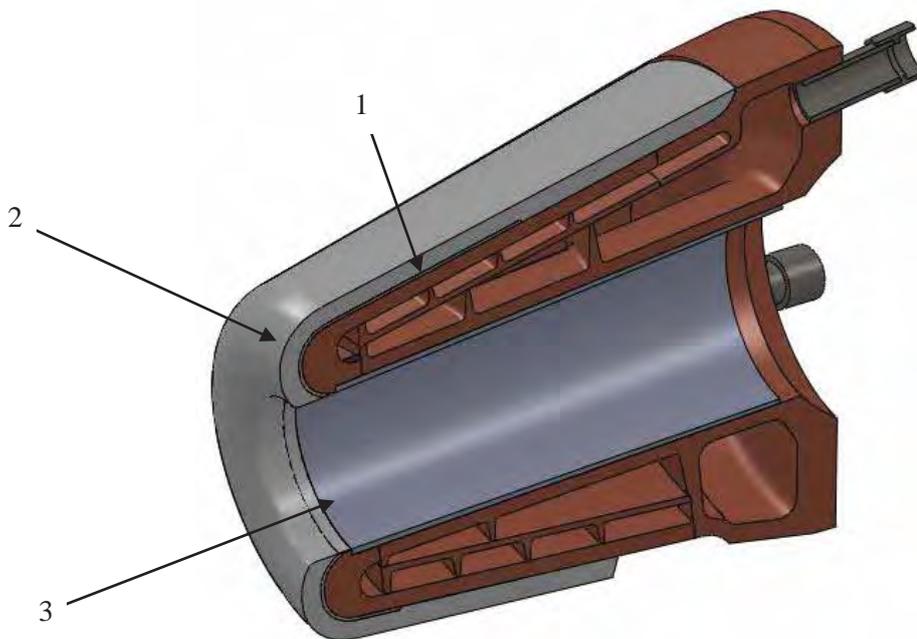


Figura 22 - Seção Longitudinal de uma Ventaneira

A ventaneira está dividida em 3 partes principais: Corpo, o difusor e a jaqueta.

Produzido em cobre fundido de alta condutividade térmica, o corpo é a parte principal da ventaneira, fornecendo toda a rigidez necessária para o conjunto e sendo a base onde os demais componentes serão soldados.

O corpo (Figura 23) possui nervuras radiais que aumentam a velocidade da água intensificando a transferência de calor por convecção.

Em conjunto com o corpo, o difusor (Figura 24) tem a única função de conduzir a água em câmaras mais reduzidas, também intensificando a transferência de calor por convecção.

A jaqueta (Figura 25) é o elemento mais externo e que recebe a maior carga térmica. Por este motivo está sujeita a maiores desgastes e pode ser substituída no caso de danos.



Figura 23 - Corpo de Ventaneira.



Figura 24 - Difusor de Ventaneira.



Figura 25- Jaqueta de Ventaneira.

A figura 26 ilustra o conjunto de sopra no qual a ventaneira é a extremidade que está diretamente em contato com o interior do Alto Forno.

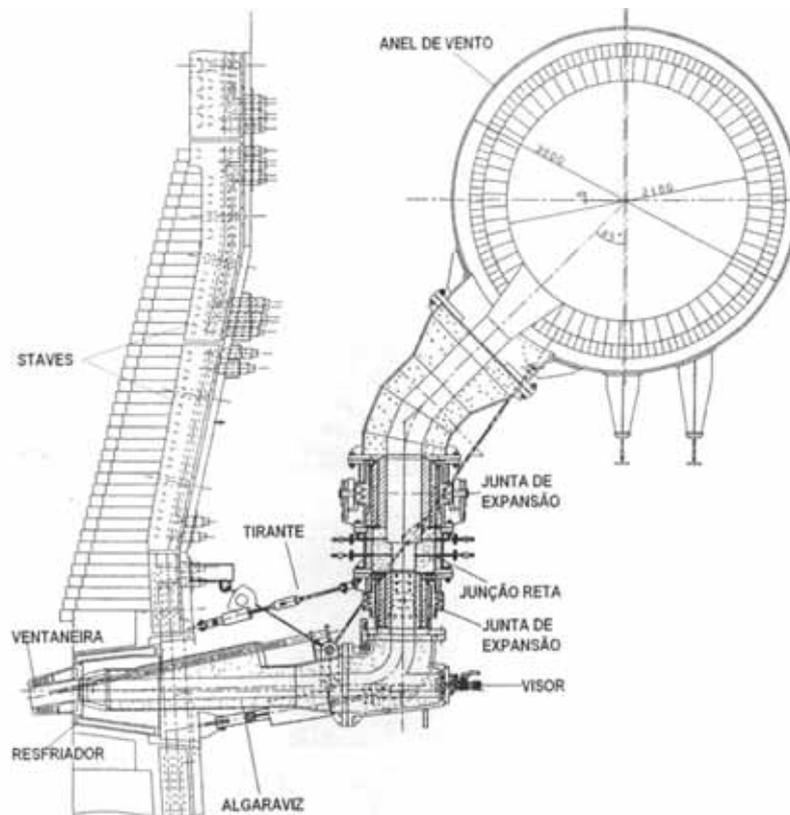


Figura 26 – Sistema de sopra quente: ventaneira, resfriador, algaraviz, conexões e anel de vento (MOURÃO, 2007).

Informações para o desenvolvimento do modelo teórico

As condições de operação a que as ventaneiras estão sujeitas podem ser resumidas em:

- Radiação frontal oriunda do metal fundido a 1520°C;
- Convecção forçada da água no interior das câmaras de refrigeração. Vazões médias de 30m³/h a 15kgf/cm² de pressão de entrada;
- Condução radial nas paredes devido ao contato com a carga sendo derretida.
- Convecção forçada no seu furo central devido ao fluxo de ar quente a 1160°C e aproximadamente 1,7kgf/cm² de pressão de sopra.

3.3 METODOLOGIA DE CÁLCULO E OBTENÇÃO DE RESULTADOS

3.3.1 DADOS COLETADOS

Os dados de operação foram obtidos através de medidores de vazão e temperatura em uma ventaneira real em um alto forno de uma usina siderúrgica brasileira de grande porte.

A tabela abaixo lista os parâmetros obtidos pelo sistema de aquisição de dados do alto forno em um instante de operação.

Tabela 1 – Dados obtidos de uma ventaneira em operação em uma usina siderúrgica brasileira de grande porte.

DADOS	UNIDADE	VALOR
TEMPERATURA DE ENTRADA DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO	°C	28
TEMPERATURA DE SAÍDA DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO	°C	33
TEMPERATURA DO SOPRO QUENTE	°C	1160
TEMPERATURA DO METAL LÍQUIDO	°C	1520
TEMPERATURA DA ATMOSFERA INTERNA DO FORNO	°C	2200 °C no Raceway / 130 °C no topo
TEMPERATURA DO RACEWAY*	°C	2100 – 2250
VAZÃO DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO	m³/h	30
VAZÃO DO SOPRO QUENTE	Nm³/min	2750
VAZÃO DE AR SOPRADO	Nm³/min	2500
VAZÃO DE OXIGÊNIO DE ENRIQUECIMENTO	Nm³/min	250

* Raceway é o nome dado à chama produzida pela queima do ar quente e o coque.

A partir dos dados acima, pode-se obter a diferença de temperaturas médias de entrada e saída, $T_{m,ent}$ e $T_{m,sai}$

$$(T_{m,sai} - T_{m,ent}) = (33 - 28) = 5 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (17)$$

Temperatura média T_m adotada, será então

$$T_m = \frac{T_{m,sai} + T_{m,ent}}{2} = \frac{33 + 28}{2} = 30,5 \text{ [}^\circ\text{C]} \text{ ou } 303,65 \text{ [K]} \quad (18)$$

Com o valor da temperatura média, podemos obter os valores das propriedades termofísicas coerentes com a presente análise. Vide tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades termofísicas da água na temperatura média T_m (INCROPERA, DEWITT, 2002).

Temperatura	Viscosidade	Viscosidade Cinemática	N° Prandtl	Condutividade Térmica
T_m	μ	ν	Pr	k
[K]	[kg/s.m]	[m ² /s]	-	[W/m.K]
303,65	0,0008034	$8,067 \times 10^{-7}$	5,452	0,617

Abaixo propriedades dos materiais utilizados nos cálculos

Tabela 3 - Propriedades Térmicas dos materiais utilizados.

Material	Condutividade Térmica
	k
	[W/m.K]
Cobre Corpo	230
Cobre Difusor	230
Cobre jaqueta	325,7
Revestimento Duro	9,8
Concreto Refratário Externo	2,63
Cone Refratário Interno	19

3.3.2 MODELO NUMÉRICO

Diante das condições de contorno estimadas, foi elaborada um Planilha em formato Excel com as seções do modelo e suas características dimensionais. Nesta planilha foram equacionadas as correlações pertinentes e obtidos os valores do Coeficiente Convectivo para cada seção. Ver planilha anexo 1.

Com estes valores em mãos, foi possível modelar o processo no software Ansys Workbench V13 aplicando as condições de escoamento e carregamento térmico adequadas.

As condições de contorno foram aplicadas conforme ilustrado na figura 27.

Através da ferramenta *Reaction Probe* do software Ansys, foi possível extrair um valor para o fluxo de calor por convecção no interior das câmaras de refrigeração de 148.430 [W]. Aplicando este valor à equação da conservação de energia

$$Q = \dot{m} C_p (T_{m,sai} - T_{m,ent}) \quad (19)$$

temos que

$$148430 [W] = 8,33 \left[\frac{kg}{s} \right] \cdot 4,178 \left[\frac{KJ}{kg \cdot K} \right] \cdot (T_{m,sai} [^{\circ}C] - T_{m,ent} [^{\circ}C])$$

resultando em uma variação de temperatura de

$$(T_{m,sai} - T_{m,ent}) = 4,26 [^{\circ}C]$$

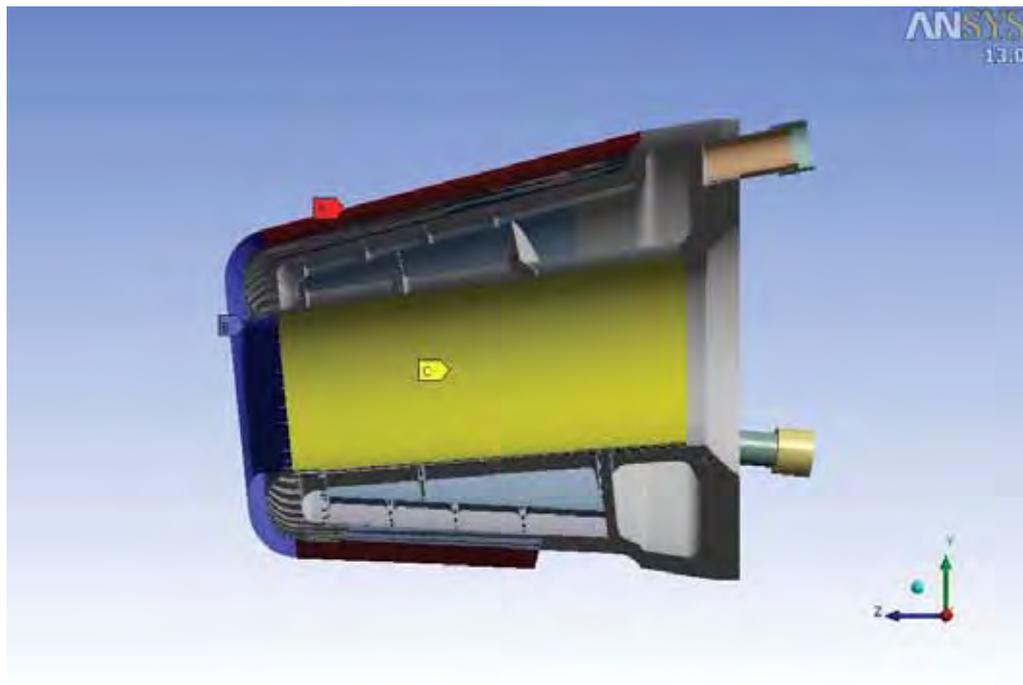


Figura 27 - Condições de Contorno.

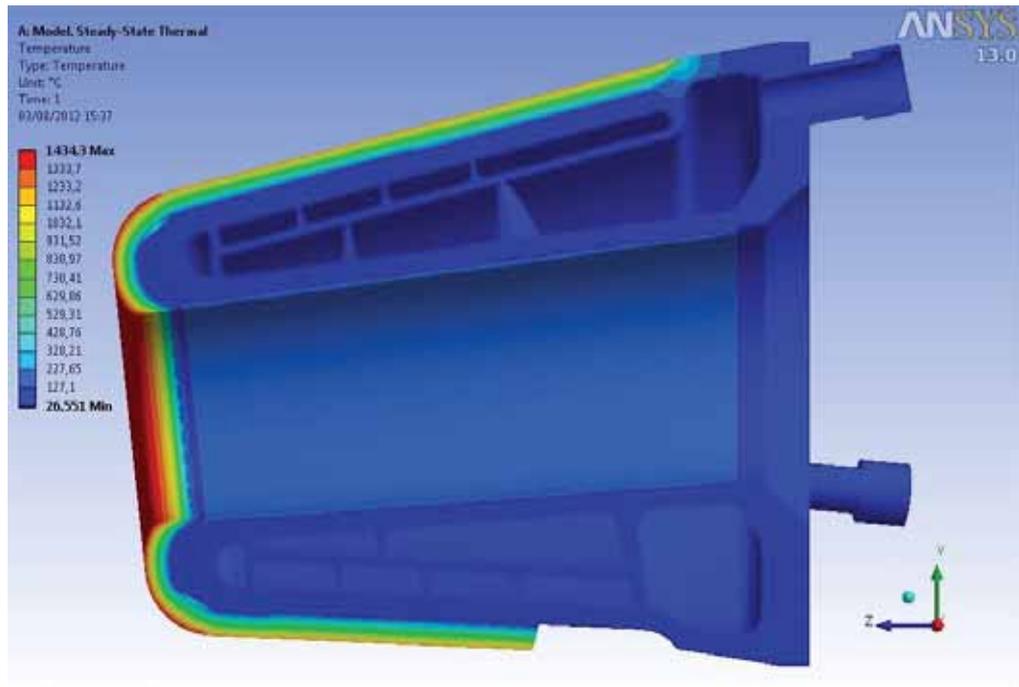


Figura 28 – Resultado numérico para as temperaturas.

3.3.3 MODELO ANALÍTICO

A ventaneira do estudo foi segmentada em 8 regiões predominantemente anulares, sendo cada uma delas subdividida em pares de superfície/fluido e espessuras de parede para que fossem calculadas as resistências térmicas de condução e de convecção. Ver Figura 29.

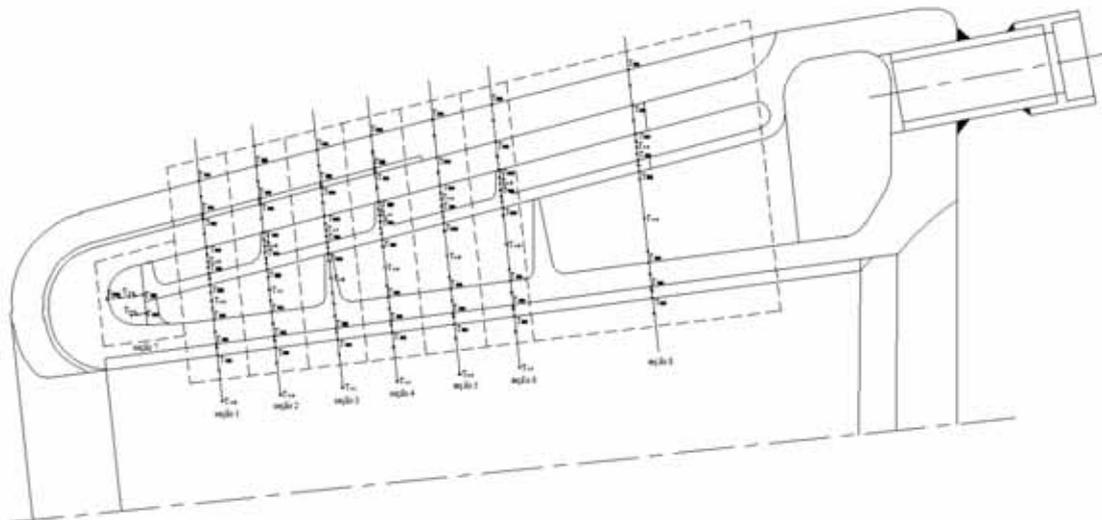


Figura 29 – Segmentação do Modelo em 8 regiões.

As temperaturas de parede foram obtidas através da Análise Numérica previamente realizada.

Considerações efetuadas para o Cálculo dos Fluxos de Calor

Considerações quanto ao escoamento

- 1 – Turbulento
- 2 – Completamente Desenvolvido Hidraulicamente
- 3 – Completamente Desenvolvido Termicamente

Considerações quanto à geometria

- 1 – Geometria considerada cilíndrica paralela, utilizando um raio médio do tronco de cone formado
- 2 – Desconsiderado o comprimento radial das nervuras como resistências de condução, substituída por superfície molhada
- 3 – Desconsiderado o efeito de “intensificadora de calor” das nervuras, substituído por superfície cilíndrica molhada.
- 4 – Quando interface líquido/sólido estiver posicionada sobre uma nervura, será considerada a média dos coeficientes convectivos das câmaras adjacentes.
- 5 – A subdivisão 8 foi considerada em meia circunferência (180°).
- 6 – Sólidos considerados lisos e homogêneos.

Diante das considerações efetuadas, foi elaborada uma Planilha no formato Excel com as equações pertinentes ao cálculo das Resistências Térmicas de condução e Convecção. Ver Planilha anexo 2.

A soma dos fluxos de calor por convecção foi de 167.215 [W]. Aplicando este valor à equação (19) temos que

$$167215 [W] = 8,33 \left[\frac{kg}{s} \right] \cdot 4,178 \left[\frac{KJ}{kg \cdot K} \right] \cdot (T_{m,sai} [^{\circ}C] - T_{m,ent} [^{\circ}C])$$

resultando em uma variação de temperatura de

$$(T_{m,sai} - T_{m,ent}) = 4,80 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Tabela 4 – Comparação da Variação de Temperatura ($T_{m,sai} - T_{m,ent}$), por modelagem numérica e modelagem analítica.

	($T_{m,sai} - T_{m,ent}$)
Operação	5 [°C]
Modelagem Numérica	4,26 [°C]
Modelagem Analítica	4,80 [°C]

4. DISCUSSÃO

Os resultados apresentados sugerem que as considerações adotadas foram válidas para o modelo físico do objeto de estudo. Entretanto certa precaução deve ser tomada em estudos relacionados a projetos onde a ordem de grandeza dos fatores considerados são muito diferentes, por exemplo: se o ângulo de conicidade da ventaneira for muito acentuado, a condição geométrica 1 poderá ser invalidada por ignorar o fator geométrico de uma superfície acentuadamente cônica.

Certos erros são esperados devido à não uniformidade do valor do coeficiente convectivo dentro de uma dada seção não circular. O presente estudo adotou a uniformidade deste coeficiente.

Não foram obtidos os dados de incerteza da medição efetuada pelo supervisor operacional da ventaneira, deste modo, podemos considerar a incerteza de medição como sendo a metade do menor valor da escala de medição, no caso 1°C . Sendo assim podemos estabelecer um intervalo de confiança para a temperatura experimental de $[4,5;5,5]^{\circ}\text{C}$.

5. CONCLUSÕES

- Apesar das condições de contorno da modelagem numérica da ventaneira possuírem um alto grau de imprecisão devido ao regime de operação do Alto Forno ser transitório, e a região interna da ventaneira ser muito irregular foi possível obter uma resposta tanto numérica quanto analítica próxima dos valores reais;
- As ventaneiras são peças fundidas, portanto certas heterogeneidades dos materiais são esperadas, por exemplo condutividade térmica e/ou espessura de parede. Entretanto tais heterogeneidades não impactaram em diferenças significativas de propriedades;
- Através da estimativa do fator de atrito, será possível prever valores para a perda de carga da ventaneira, uma vez que este fator é importante e muitas vezes limitante para o sistema de refrigeração do forno;
- A ferramenta de cálculo desenvolvida neste trabalho possibilitará a validação teórica de projetos de ventaneiras nunca antes estudadas. Tal validação agrega confiabilidade no fornecimento do equipamento e possibilita a identificação de problemas operacionais através da diferença exagerada de temperaturas de entrada e saída da água;
- Para trabalhos futuros, poderão ser avaliadas as condições extremas de operação, considerando o desgaste do material refratário externo e/ou instantes de refrigeração ausente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRITO, H. L.; SOUZA, I. A. **Aumento da Vida Útil das Ventaneiras do Alto Forno “A” da Arcelor Mittal Monlevade**, 2009.

GEERDES, M.; TOXOPEUS, H.; VLIET, C.V.D. **Modern Blast Furnace Ironmaking**, 2nd ed, 2009.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; **Fundamentos da Transferência de Calor**, 5^a Ed, Editora LTC, 2002.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 5^a Ed, Editora LTC, 1998.

MOURÃO, M. B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYJ, A.; LEANDRO, C. A. S.; TAKANO, C.; QUITES, E. E. C.; GENTILE, E. F.; SILVA, G. F. B. L.; BOLOTA, J. R.; GONÇALVES, M.; FACO, R. J. (2007). **Introdução à Siderurgia** – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

SANTOS, R. J.; BORGES, W. O.; SANTOS, J. A.; TAVARES, R. P. **Proposta de Controle do Desgaste do Cadinho através de um sistema de refrigeração baseado em “Stave Coolers”**.

SHELLHAMMER, T.; WALSH, R. **High-Conductivity Copper in the Blast Furnace**. Presente at AIST 2010 – The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, Pittsburgh, Pa., and published in the Conference Proceedings, 2011.

SILVA, A. L.C.; MEI, P. R. (1988). **Aços e ligas especiais**, 2^a Ed. São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 1988, 29 p.

<http://www.abmbrasil.com.br> - Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração.

<http://www.aist.org> - Association for Iron & Steel Technology.

APÊNDICE A - PLANILHA DE CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO

Parâmetros	Temperatura Fluido	Viscosidade Cinemática	Vazão Volumétrica	Massa Específica	Vazão Massica	Área*	Perímetro	Diâmetro Hidráulico*	Velocidade Média	Nº Reynolds	Nº Prandtl	Condutividade Térmica	Fator de Atrito*	Nº Nusselt	Coefficiente Convectivo
Unidades	T _∞ [K]	ν [m ² /s]	Q [m ³ /s]	ρ [kg/m ³]	m [kg/s]	At [m ²]	P [m]	Dh [m]	um [m/s]	ReD	Pr	k [W/m.K]	f	Nu	h [W/m ² .K]
1	303,65	8,0677E-07	0,00833	995,8	8,30	0,00080	0,140	0,022777	10,42	294079	5,452	0,617	0,0145	1356,35	36752,92
2	303,65	8,0677E-07	0,00833	995,8	8,30	0,00081	0,142	0,022815	10,32	291877	5,452	0,617	0,0145	1347,57	36454,75
3	303,65	8,0677E-07	0,00833	995,8	8,30	0,00085	0,148	0,023035	9,79	279648	5,452	0,617	0,0146	1298,67	34797,35
4	303,65	8,0677E-07	0,00833	995,8	8,30	0,00097	0,166	0,023438	8,59	249593	5,452	0,617	0,0150	1177,30	31002,07
5	303,65	8,0677E-07	0,00833	995,8	8,30	0,00052	0,091	0,023089	15,91	455414	5,452	0,617	0,0134	1980,42	52939,05
6	303,65	8,0677E-07	0,00833	995,8	8,30	0,00183	0,217	0,033694	4,55	189963	5,452	0,617	0,0158	930,55	17045,80
7	303,65	8,0677E-07	0,00833	995,8	8,30	0,00360	0,279	0,051718	2,31	148248	5,452	0,617	0,0166	751,88	8972,95
8	303,65	8,0677E-07	0,00833	995,8	8,30	0,01151	0,524	0,087918	0,72	78892	5,452	0,617	0,0189	437,70	3072,74
9	1433,15	2,2195E-04	4,35195	0,371	1,61	0,01767	0,471	0,150000	246,27	166436	0,700	0,090	0,0162	266,70	160,02

* Jusificativa: Foram utilizadas casas decimais adicionais devido à proximidade dos resultados de mesmo parâmetros.

APÊNDICE B - PLANILHA DE CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS DE CONDUÇÃO E CONVECÇÃO

Seção	h [W/m ² .K]	Par	T _∞ [°C]	ri [m]	Ti [°C]	re [m]	Te [°C]	L [m]	k [W/m.K]	Rconv [K/W]	Rcond [K/W]	Delta T [K]	Q [W]	Q abs [W]
1	160,02	ar quente	cone	0,07726	175	0,00000	0,0315	0	0,40869	0	0	985	2410	2410
1	0	cone	cone	0,07726	175	0,08326	79	0,0315	19	0	0,01990	-96	-4824	4824
1	0	corpo	corpo	0,08326	79	0,09626	61	0,0315	230	0	0,00319	-18	-5646	5646
1	17045,8	corpo	água	0,09626	61	0,00000	0	0,0315	0	0,00308	0	-28	-9093	9093
1	17045,8	água	difusor	0,11500	29,5	0,00000	0	0,0315	0	0,00258	0	3,5	1358	1358
1	0	difusor	difusor	0,11500	29,5	0,12107	28,8	0,0315	230	0	0,00113	-0,7	-619	619
1	36752,92	difusor	água	0,12107	28,8	0,00000	0	0,0315	0	0,00114	0	-0,8	-705	705
1	36752,92	água	jaqueta	0,13524	34,5	0,00000	0	0,0315	0	0,00102	0	-6,5	-6394	6394
1	0	jaqueta	jaqueta	0,13524	34,5	0,15043	43,8	0,0315	325,7	0	0,00165	9,3	5634	5634
1	0	inconel	inconel	0,15043	43,8	0,15346	100	0,0315	9,8	0	0,01031	56,2	5454	5454
1	0	alfrax	alfrax	0,15346	100	0,17067	1200	0,0315	2,63	0	0,20417	1100	5388	5388
2	160,02	ar quente	cone	0,07810	175,5	0,00000	0	0,031875	0	0,39952	0	984,5	2464	2464
2	0	cone	cone	0,07810	175,5	0,08410	81	0,031875	19	0	0,01946	-94,5	-4857	4857
2	0	corpo	corpo	0,08410	81	0,09711	64,8	0,031875	230	0	0,00312	-16,2	-5190	5190
2	17045,8	corpo	água	0,09711	64,8	0,00000	0	0,031875	0	0,00302	0	-31,8	-10542	10542
2	17045,8	água	difusor	0,11983	29,55	0,00000	0	0,031875	0	0,00244	0	3,45	1411	1411
2	0	difusor	difusor	0,11983	29,55	0,12590	28,8	0,031875	230	0	0,00107	-0,75	-699	699
2	36603,835	difusor	água	0,12590	28,8	0,00000	0	0,031875	0	0,00108	0	-0,8	-738	738
2	36603,835	água	jaqueta	0,14007	34,1	0,00000	0	0,031875	0	0,00097	0	-6,1	-6264	6264
2	0	jaqueta	jaqueta	0,14007	34,1	0,15526	42,7	0,031875	325,7	0	0,00158	8,6	5451	5451
2	0	inconel	inconel	0,15526	42,7	0,15829	99,5	0,031875	9,8	0	0,00987	56,8	5755	5755
2	0	alfrax	alfrax	0,15829	99,5	0,17550	1200	0,031875	2,63	0	0,19592	1100,5	5617	5617
3	160,02	ar quente	cone	0,07901	171,6	0,00000	0	0,031	0	0,40609	0	988,4	2434	2434
3	0	cone	cone	0,07901	171,6	0,08501	78,8	0,031	19	0	0,01979	-92,8	-4690	4690
3	0	corpo	corpo	0,08501	78,8	0,09801	64	0,031	230	0	0,00318	-14,8	-4658	4658
3	13009,375	corpo	água	0,09801	64	0,00000	0	0,031	0	0,00403	0	-31	-7699	7699

3	13009,375	água	difusor	33	0,12501	30,4	0,00000	0	0,031	0	0,00316	0	2,6	824	824
3	0	difusor	difusor	0	0,12501	30,4	0,13109	29,1	0,031	230	0	0,00106	-1,3	-1228	1228
3	36454,75	difusor	água	28	0,13109	30,4	0,00000	0	0,031	0	0,00107	0	-2,4	-2234	2234
3	36454,75	água	jaqueta	28	0,14526	33,9	0,00000	0	0,031	0	0,00097	0	-5,9	-6085	6085
3	0	jaqueta	jaqueta	0	0,14526	33,9	0,16044	43	0,031	325,7	0	0,00157	9,1	5807	5807
3	0	inconel	inconel	0	0,16044	43	0,16348	100,6	0,031	9,8	0	0,00982	57,6	5863	5863
3	0	alfrax	alfrax	0	0,16348	100,6	0,18069	1200	0,031	2,63	0	0,19538	1099,4	5627	5627
4	160,02	ar quente	cone	1160	0,07980	171,9	0,00000	0	0,031089	0	0,40089	0	988,1	2465	2465
4	0	cone	cone	0	0,07980	171,9	0,08581	82	0,031089	19	0	0,01954	-89,9	-4601	4601
4	0	corpo	corpo	0	0,08581	82	0,09881	65,5	0,031089	230	0	0,00314	-16,5	-5253	5253
4	8972,95	corpo	água	33	0,09881	65,5	0,00000	0	0,031089	0	0,00577	0	-32,5	-5629	5629
4	8972,95	água	difusor	33	0,12957	29,5	0,00000	0	0,031089	0	0,00440	0	3,5	795	795
4	0	difusor	difusor	0	0,12957	29,5	0,13564	28,7	0,031089	230	0	0,00102	-0,8	-785	785
4	36626,05	difusor	água	28	0,13564	29,5	0,00000	0	0,031089	0	0,00103	0	-1,5	-1456	1456
4	36626,05	água	jaqueta	28	0,14982	33,4	0,00000	0	0,031089	0	0,00093	0	-5,4	-5788	5788
4	0	jaqueta	jaqueta	0	0,14982	33,4	0,16500	43	0,031089	325,7	0	0,00152	9,6	6327	6327
4	0	inconel	inconel	0	0,16500	43	0,16804	100	0,031089	9,8	0	0,00953	57	5983	5983
4	0	alfrax	alfrax	0	0,16804	100	0,18525	1200	0,031089	2,63	0	0,18979	1100	5796	5796
5	160,02	ar quente	cone	1160	0,08071	173,6	0,00000	0	0,0325	0	0,37916	0	986,4	2602	2602
5	0	cone	cone	0	0,08071	173,6	0,08672	82,8	0,0325	19	0	0,01849	-90,8	-4911	4911
5	0	corpo	corpo	0	0,08672	82,8	0,09972	66	0,0325	230	0	0,00298	-16,8	-5647	5647
5	8972,95	corpo	água	33	0,09972	66	0,00000	0	0,0325	0	0,00547	0	-33	-6030	6030
5	8972,95	água	difusor	33	0,13478	29,5	0,00000	0	0,0325	0	0,00405	0	3,5	864	864
5	0	difusor	difusor	0	0,13478	29,5	0,14086	28,8	0,0325	230	0	0,00094	-0,7	-746	746
5	34797,35	difusor	água	28	0,14086	28,8	0,00000	0	0,0325	0	0,00100	0	-0,8	-801	801
5	34797,35	água	jaqueta	28	0,15503	33,5	0,00000	0	0,0325	0	0,00091	0	-5,5	-6059	6059
5	0	jaqueta	jaqueta	0	0,15503	33,5	0,17021	41,4	0,0325	325,7	0	0,00140	7,9	5623	5623
5	0	alfrax	alfrax	0	0,17021	41,4	0,19038	1200	0,0325	2,63	0	0,20845	1158,6	5558	5558
6	160,02	ar quente	cone	1160	0,08159	173	0,00000	0	0,024911	0	0,48937	0	987	2017	2017
6	0	cone	cone	0	0,08159	173	0,08759	80,5	0,024911	19	0	0,02387	-92,5	-3875	3875

6	0	corpo	corpo	0	0,08759	80,5	0,10059	64	0,024911	230	0	0,00385	-16,5	-4291	4291
6	8972,95	corpo	corpo	33	0,10059	64	0,00000	0	0,024911	0	0,00708	0	-31	-4380	4380
6	8972,95	água	difusor	33	0,13978	29,6	0,00000	0	0,024911	0	0,00509	0	3,4	667	667
6	0	difusor	difusor	0	0,13978	29,6	0,14586	29	0,024911	230	0	0,00118	-0,6	-508	508
6	32899,71	difusor	água	28	0,14586	29	0,00000	0	0,024911	0	0,00133	0	-1	-751	751
6	32899,71	água	jaqueta	28	0,16003	33,7	0,00000	0	0,024911	0	0,00121	0	-5,7	-4697	4697
6	0	jaqueta	jaqueta	0	0,16003	33,7	0,17521	41,4	0,024911	325,7	0	0,00178	7,7	4330	4330
6	0	alfrax	alfrax	0	0,17521	41,4	0,19506	1200	0,024911	2,63	0	0,26062	1158,6	4446	4446
7	52939,05	água	jaqueta	30,5	0,11322	44	0,00000	0	0,056	0	0,00047	0	-13,5	-28471	28471
7	52939,05	água	corpo	30,5	0,11322	36	0,00000	0	0,0202	0	0,00131	0	-5,5	-4184	4184
7	52939,05	água	difusor	30,5	0,11322	30,6	0,00000	0	0,014154	0	0,00188	0	-0,1	-53	53
8	160,02	ar quente	cone	1160	0,08361	164	0,00000	0	0,131158	0	0,18139	0	996	5491	5491
8	0	cone	cone	0	0,08361	164	0,08961	84	0,131158	19	0	0,00886	-80	-9034	9034
8	0	corpo	corpo	0	0,08961	84	0,10262	67,9	0,131158	230	0	0,00143	-16,1	-11259	11259
8	3072,74	corpo	água	33	0,10262	67,9	0,00000	0	0,131158	0	0,00770	0	-34,9	-4534	4534
8	3072,74	água	difusor	33	0,15137	30	0,00000	0	0,131158	0	0,00522	0	3	575	575
8	0	difusor	difusor	0	0,15137	30	0,15744	28,9	0,131158	230	0	0,00042	-1,1	-2651	2651
8	31002,07	difusor	água	28	0,15744	28,9	0,00000	0	0,131158	0	0,00050	0	-0,9	-1810	1810
8	31002,07	água	jaqueta	28	0,17161	35,5	0,00000	0	0,131158	0	0,00046	0	-7,5	-16442	16442
8	0	jaqueta	jaqueta	0	0,17161	35,5	0,18680	50	0,131158	325,7	0	0,00063	14,5	22953	22953
8	0	alfrax	alfrax	0	0,18680	50	0,20590	1200	0,131158	2,63	0	0,08983	1150	12802	12802

Fluxo Total Convecção = 167.215 [W]