

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE FORNOS PARA LAMINAÇÃO E TRATAMENTO TÉRMICO ATRAVÉS DE BALANÇO TÉRMICO ¹

Antonio Augusto Gorni ²
Maurício Martins Pereira ³
Robson Rodrigues Fialho ⁴
Guilherme Klaus Pfeitsticker ⁵
Lúcio Rosa da Silva ⁶
Paulo Freire Jr. ⁷

RESUMO

A economia de energia é um tema que se encontra na berlinda há mais de trinta anos, seja em função de crises no fornecimento de petróleo, racionamentos de eletricidade ou a crescente conscientização ecológica. A execução de balanços térmicos realistas, feitos a partir de dados fidedignos e sem simplificações exageradas, permite uma diagnose bastante eficiente sobre o desempenho energético dos fornos, permitindo priorizar os esforços para se economizar energia de forma financeiramente viável. Este trabalho mostra aplicações do balanço térmico em vários fornos usados na laminação de produtos planos, inclusive em equipamentos onde ele é muito pouco usado, como nos fornos para tratamento térmico de chapas grossas e para recozimento em caixa de bobinas laminadas a frio.

Palavras-Chave: Balanço Térmico, Economia de Energia, Fornos para Laminação

¹ Trabalho a ser apresentado ao XXIV Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 6 a 8 de agosto de 2002, São Paulo SP.

² Engenheiro de Materiais, M. Eng., D. Eng., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

³ Engenheiro Metalurgista, Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁴ Técnico Metalurgista, Operador de Produção da Gerência de Acabamento de Chapas Grossas, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁵ Engenheiro Metalurgista, Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Frio, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁶ Técnico Metalurgista, Assistente de Operação da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Frio da COSIPA, Cubatão SP.

⁷ Técnico Instrumentista, Líder de Inspeção Elétrica da Gerência de Recozimento e Encruamento, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

- INTRODUÇÃO

As últimas décadas têm mostrado que, também no campo da energia, nada como um dia depois do outro. A necessidade de se economizar energia - e o tipo de energia a ser poupado - tem oscilado significativamente ao longo do tempo. Mas, como sempre, uma economia racional de energia é saudável, pois inevitavelmente reduz os custos operacionais e aumenta a competitividade das empresas, fator que se tornou a nova paranóia empresarial a partir dos anos noventa. Soma-se a esses fatores a preocupação mundial cada vez maior com a ecologia, com ênfase no chamado efeito estufa provocado pelo gás carbônico produzido pela queima de combustíveis fósseis.

O balanço térmico é uma das ferramentas mais eficazes para se diagnosticar o nível de desempenho energético para fornos siderúrgicos. Como se sabe, ele nada mais é do que a quantificação de todas as entradas e saídas de calor de um forno. Sua aplicação é mais comum em altos-fornos e conversores LD, onde faz parte do próprio processo metalúrgico. Em outras aplicações, como no caso dos fornos usados em laminações, ele é relegado a segundo plano, pois já não é vital ao processo. Além disso, a quantidade de energia envolvida é menor, particularmente para os fornos de tratamento térmico e recozimento. Nestes casos, porém, perde-se uma excelente oportunidade para se fazer uma auditoria contínua no processo do ponto de vista energético, identificando seus pontos fracos e até quantificando os ganhos decorrentes de sua eliminação.

Para que um balanço térmico seja fidedigno é necessário não só dispor de um bom algoritmo de cálculo, como também medir precisamente todos os parâmetros operacionais que se fizerem necessários ao cálculo das quantidades de calor envolvidas. É bem verdade que essas medições podem ser penosas, demoradas e caras, mas a quantidade de hipóteses e dados assumidos deve ser mínima para se garantir que o balanço térmico não seja apenas um mero exercício de ficção.

A COSIPA, dentro de sua filosofia de melhoria contínua de seus processos industriais, decidiu implantar a execução rotineira de balanços térmicos nos fornos de laminação visando identificar suas deficiências do ponto de vista energético e priorizar sua correção em função dos resultados obtidos nas simulações. O primeiro passo dentro desse projeto foi desenvolver um *software* próprio para cálculo do balanço térmico. Ele foi desenvolvido usando-se a linguagem Visual Basic dentro de uma planilha Microsoft Excel. Essa combinação alia a facilidade para introdução e visualização de dados típica da interface gráfica com a potência computacional de uma linguagem estruturada de alto nível. As equações e dados necessários ao algoritmo de cálculo foram extraídos de diversas referências [1-6]. Esse programa-mestre foi adaptado para calcular o balanço térmico de fornos de reaquecimento de placas, fornos de tratamento térmico para chapas grossas e fornos para recozimento de bobinas a frio. Seu desenvolvimento e uso será descrito a seguir.

- BALANÇO TÉRMICO DO FORNO DE REAQUECIMENTO DE PLACAS

Nos fornos de placas as fontes de calor disponíveis para aquecimento são basicamente a queima de combustível, o ar pré-aquecido da combustão e o calor decorrente da formação de carepa na placa. Já as perdas de calor ocorrem através das placas reaquecidas, pelos fumos aquecidos que saem pela chaminé, a água de refrigeração dos skids, o calor irradiado pelas paredes do forno e outras perdas menores. Num balanço térmico ideal a quantidade total calculada de calor que entra no forno teria de ser igual à quantidade total de calor que sai dele, mas na prática isso é totalmente inviável. Sempre haverá uma dife-

rença entre elas que, contudo, deverá ter o menor valor possível. Ela permite avaliar a precisão e cuidado com que foi feito o balanço térmico.

Os dados necessários para o cálculo do balanço térmico do forno de placas, a serem coletados periodicamente ao longo do tempo são vazão de gás combustível, vazão de ar de combustão, vazão de água de refrigeração nos *skids* do forno, temperatura do ar de combustão, temperatura dos fumos na entrada e saída do recuperador, temperatura de entrada e saída da água usada na refrigeração dos *skids* e composição química do gás combustível. Há outros parâmetros necessários ao balanço térmico que são fixos ao longo do tempo, tais como as temperaturas das paredes externas do forno de placas, dimensões do forno e fração de carepa sobre as placas reaquecidas.

O balanço térmico deve ser executado ao longo de um período de tempo suficientemente longo para que ele compile dados de uma condição típica de operação do equipamento e não eventuais transientes localizados. Neste caso os dados para o cálculo do balanço foram coletados ao longo de um turno, ou seja, oito horas de operação.

Os resultados do balanço térmico podem ser vistos na tabela I. Em primeiro lugar, note-se que a parcela de perda relativa a "Outros" (na verdade a parcela usada para conciliação do balanço térmico) é da ordem de 1,5% - um valor bastante razoável para o caso do forno de reaquecimento de placas. Como seria de se esperar, a maior contribuição ao aquecimento veio da combustão, com 612 Mcal/t de aço reaquecido, o que corresponde a 74% do aporte térmico total. O calor sensível do ar de combustão veio em segundo lugar, com 194 Mcal/t ou 24% do total. A contribuição da reação exotérmica de oxidação do ferro foi mínima, 19 Mcal/t ou aproximadamente 2% do total. O aporte térmico específico foi de 825 Mcal/t de aço; esse alto consumo específico decorreu da baixa produtividade do forno durante o período analisado, que foi da ordem de 50 t/h, em função de outros problemas da linha.

ENTRADAS DE CALOR	Mcal/ t aço	%
Calor de Combustão do Gás	612,3	74,2
Calor Sensível do Ar	194,0	23,5
Calor de Formação da Carepa	18,7	2,3
Calor Sensível de Placas	0,0	0,0
TOTAL	824,9	100

SAÍDAS DE CALOR	Mcal/ t aço	%
Calor Absorvido pelas Placas	192,2	23,3
Calor Sensível dos Fumos	449,1	54,4
Calor Refrigeração Skids	138,2	16,8
Calor Perdido Paredes	33,7	4,1
Outros	11,6	1,4
TOTAL	824,9	100

Tabela I: Resultado de um balanço térmico efetuado para o forno de reaquecimento de placas da linha de laminação de chapas grossas da COSIPA.

A análise sobre as saídas de calor revelou um resultado intrigante: a maior parte do calor - 449 Mcal/t de aço ou 54% do calor total fornecido - saem na forma de fumos aquecidos! Somente 192 Mcal/t de aço (apenas 23% do calor total) realmente são aproveitados de forma útil, ou seja, no reaquecimento das placas de aço. Além disso, 138 Mcal/t (17%) são levados pelo sistema de refrigeração dos *skids* e 34 Mcal/t (4%) são irradiados pelas paredes do forno para o ambiente externo.

A tabela II mostra resumidamente as oportunidades para economia de energia que foram identificadas e hierarquizadas pelo balanço térmico. Essa análise pode se iniciar pela perda significativa de calor através dos fumos que saem pela chaminé, revelada pelo balanço térmico, que merece ser investigada com mais cuidado. Os dados de entrada permitem constatar que a relação média ar:combustível usada no período escolhido para se fa-

zer o balanço térmico foi da ordem de 12,8:1, um valor exageradamente alto quando se sabe que se consegue uma boa combustão para valores de relação ar-combustível entre 6,5:1 e 7:1 para o gás combustível usado na COSIPA. Ao se calcular um balanço térmico hipotético assumindo-se uma relação ar:combustível de 7:1 e todas as demais condições constantes ocorre, em primeiro lugar, um considerável aumento da eficiência do equipamento: o calor derivado da queima de combustível cai de 612 para 477 Mcal/t - ou seja, uma apreciável redução de 22% no consumo energético! De fato, as quantidades de calor que saem contidas nas placas reaquecidas e nos gases de combustão passam a ficar praticamente iguais, evitando o sério desbalanceado verificado sob condições reais: 192 Mcal/t (33%) e 207 Mcal/t (36%), respectivamente. Considerando-se um custo de R\$ 38,50 por Gcal gerada pela queima do gás combustível, essa redução na quantidade do ar de combustão implica numa economia de R\$ 5,20 por tonelada de aço reaquecido.

MELHORIA	CONSUMO ATUAL DE GÁS [Mcal/t]	CONSUMO PREVISTO [Mcal/t]	REDUÇÃO [Mcal/t (%)]	ECONOMIA [R\$/t aço]
Uso de relação ar:combustível 7:1	612	477	135 (22)	5,20
Enfornamento de placa a 250°C	612	514	98 (16)	3,80
Idem, 400°C	612	447	159 (27)	6,35

Tabela II: Oportunidades para economia de energia identificadas e hierarquizadas pelo balanço térmico.

Uma conseqüência colateral é a ligeira queda na participação do calor sensível do ar de combustão pré-aquecido no aporte térmico ao forno, que cai para 83 Mcal/t (14%), pois agora é necessário menor quantidade de ar para a combustão. Aqui há um benefício secundário, mas não desprezível: menores vazões de ar de combustão significam menor consumo de energia elétrica nos sopradores de ar, além de menor esforço (e correspondente desgaste) nesse equipamento. Por outro lado, a combustão tem de ser monitorada com mais cuidado, pois uma eventual elevação no PCI da mistura gasosa combustível pode produzir combustão incompleta, com liberação de fumaça preta pelas chaminés. Esta ocorrência leva a risco de multa pelas entidades que fiscalizam a emissão de poluentes.

O enfornamento a quente de placas também é uma outra contramedida que pode garantir boa economia de energia, apesar do grande problema que representa em termos de planejamento de produção e logística. Por exemplo, o enfornamento de placas a 250°C, um objetivo relativamente modesto, reduziria o calor necessário para o aquecimento das placas de aço de 192 Mcal/t para 164 Mcal/t; em termos globais, o consumo energético do forno cairia de 612 Mcal/t para 514 Mcal/t, uma queda de 16% que produziria uma economia de R\$ 3,77 por tonelada de aço enfornado. A economia seria ainda maior o enfornamento fosse realizado a 400°C: o consumo energético cairia para 447 Mcal/t, proporcionando uma economia de 27% ou R\$ 6,35 por tonelada de aço enfornado. Obviamente, para que esse potencial de economia seja conseguido, é necessário que os parâmetros operacionais do forno sejam adequadamente ajustados a essa nova condição.

Ainda há outras possibilidades de se reduzir o consumo energético, mas onde deve ser feito um estudo preliminar de viabilidade. Pode-se pensar, por exemplo, em se aumentar a temperatura do ar fornecido para a combustão. Isto, por um lado, iria requerer o redimensionamento dos recuperadores de calor do forno, um investimento de grande vulto. Por outro lado, os queimadores teriam de ser modificados em função da maior formação do poluente NO_x que ocorre na combustão com ar pré-aquecido a altas temperaturas. Outra possibilidade a ser considerada seria a redução da quantidade de calor extraída do forno

pelo sistema de refrigeração dos *skids*, que é função do jogo entre a vazão e as temperaturas inicial e final da água. O ganho energético potencial aqui é bem menor e produz certa polêmica: até que ponto a extração de calor pela água de refrigeração pode ser diminuída sem que ocorra deficiência de refrigeração e danos ao equipamento devido à alta temperatura no interior do forno? Esta é uma pergunta que demanda algum estudo para ser respondida com segurança e, de preferência, envolvendo o fabricante do forno no assunto.

- BALANÇO TÉRMICO DO FORNO DE TRATAMENTO TÉRMICO

Não é prática usual a realização de balanço térmico em fornos de tratamento térmico, constatação que parece ser confirmada pelo escasso número de referências a esse respeito [5]. Provavelmente a falta de incentivo nesse tipo de estudo decorre da quantidade relativamente pequena de energia consumida nesse equipamento. De fato, sua realização neste tipo de equipamento é até mais complicada, pois apresenta nível de instrumentação bem menor do que o disponível em fornos de reaquecimento. Além disso, há uma série de condições peculiares do equipamento que tem de ser levadas em conta, apesar do procedimento de cálculo ser muito semelhante ao efetuado para os fornos de reaquecimento.

No caso específico da COSIPA o aquecimento do forno é feito através de 202 tubos radiantes, uma vez que o interior do forno é preenchido por uma atmosfera protetiva de nitrogênio puro. Os dados de vazão de mistura gasosa combustível, ar para combustão e nitrogênio da atmosfera protetiva estão disponíveis no painel do forno. Contudo, não há registro rotineiro da temperatura do ar de combustão, nem as dos fumos na entrada e na saída do recuperador. Uma vez que cada tubo radiante dispõe de seu próprio recuperador para pré-aquecimento do ar de combustão, tornou-se necessário instalar termopares para se medir essas temperaturas. Isso foi feito em apenas quatro dos tubos radiantes, correspondentes à posição de cada chaminé do forno, uma vez que seria impraticável implantar essa instrumentação em todos os 202 tubos radiantes. Foram calculadas as médias das respectivas temperaturas medidas nesses quatro pontos, as quais foram usadas no cálculo do balanço térmico.

As portas de entrada e saída do forno são refrigeradas com água. Contudo, não foi considerada essa fonte de perda de calor no cálculo, em função da baixa vazão de água envolvida e da dificuldade em se instalar sensores de vazão e temperatura no local. A temperatura da carcaça do forno foi medida através de termografia.

O balanço térmico foi realizado considerando-se os dados de um turno de trabalho de oito horas, com o forno trabalhando em modo de austenitização para normalização/têmpera, caso em que o equipamento opera sob temperatura máxima. A tabela III mostra os resultados obtidos. Neste caso o aporte de calor ocorreu através da queima da mistura gasosa combustível e pelo calor sensível do ar de combustão. A geração de calor devido à formação de carepa foi assumida como sendo nula, uma vez que a atmosfera protetiva praticamente suprimiu a oxidação superficial das chapas grossas. No caso das saídas de calor considerou-se o calor absorvido pelas chapas grossas austenitizadas, pelos fumos, pelo fluxo de nitrogênio injetado na câmara do forno como atmosfera protetiva e o irradiado pelas paredes do forno. Como já foi afirmado anteriormente, desprezou-se a refrigeração com água que ocorre em suas portas de entrada e saída.

O erro observado no cálculo deste balanço térmico, mostrado na tabela III, foi relativamente alto, da ordem de 15%. Ele pode ser atribuído ao fato das temperaturas do ar para combustão e dos fumos antes e depois da passagem pelo recuperador terem sido amostradas em apenas 4 dos 202 tubos radiantes disponíveis, o que parece ter sido insufi-

ciente para caracterizar adequadamente a condição térmica desses componentes do balanço térmico. Ainda assim os resultados obtidos permitem que sejam tiradas algumas conclusões. Em primeiro lugar, chama a atenção a modesta contribuição do ar de combustão pré-aquecido ao aporte térmico do forno: só 37 Mcal/t de aço, cerca de 8% da demanda térmica do forno. A queima de combustível respondeu por 414 Mcal/t de aço (92%), totalizando uma demanda térmica global de 451 Mcal/t do forno.

Quanto às saídas térmicas constatou-se que os fumos absorvem a maior quantidade de calor disponível: 179 Mcal/t aço (40%); esse valor foi seguido de perto pelo calor absorvido pelas chapas grossas, que é o real objetivo do processo, da ordem de 146 Mcal/t (32%). As perdas térmicas pelas paredes do forno vêm a seguir, com 41 Mcal/t (9%), seguida do calor absorvido pelo nitrogênio injetado na câmara do forno como atmosfera protetiva, 16 Mcal/t (4%).

ENTRADAS DE CALOR	Mcal/ t aço	%
Calor de Combustão do Gás	414,0	91,7
Calor Sensível do Ar	37,3	8,3
Calor de Formação da Carepa	0,0	0,0
Calor Sensível de CGs	0,0	0,0
TOTAL	451,4	100

SAÍDAS DE CALOR	Mcal/ t aço	%
Calor Absorvido pelas CGs	145,5	32,2
Calor Sensível dos Fumos	179,1	39,7
Calor Sensível do N ₂	15,9	3,5
Calor Perdido Paredes	41,2	9,1
Outros	69,8	15,5
TOTAL	451,4	100

Tabela III: Resultado de um balanço térmico efetuado para o forno de tratamento térmico de chapas grossas da COSIPA.

A oportunidade mais visível para economia de energia aqui é a temperatura de pré-aquecimento do ar para combustão. De fato, seu valor de projeto aparentemente é muito baixo, da ordem de 170°C, e realmente os valores medidos flutuaram em torno desse valor. Em fornos do recozimento em caixa, onde as temperaturas de tratamento envolvidas são um pouco menores, entre 590 e 660°C, a temperatura de pré-aquecimento do ar para combustão é bem maior, da ordem de 450°C. Supondo-se, de forma conservadora, que se pudesse pré-aquecer o ar de combustão no forno de tratamento térmico de chapas grossas da COSIPA a 300°C, sua participação no aporte térmico seria dobrada, de 37 para 65 Mcal/t aço, possibilitando ainda uma redução no consumo de combustível de 414 Mcal/t para 386 Mcal/t (6,8%), o que proporcionaria uma redução de R\$ 1,08/t de chapa grossa. Como se pode observar, não é um valor tão atraente quanto os que foram calculados para as melhorias no caso do forno de reaquecimento de placas. Por isso mesmo, é necessário verificar se esse retorno seria compensador em função do investimento que se faria necessário para capacitar os recuperadores dos 202 tubos radiantes a pré-aquecer o ar a temperaturas superiores às previstas em seu projeto original.

- BALANÇO TÉRMICO DE FORNO DE RECOZIMENTO EM CAIXA

Mais rara ainda é a execução de balanço térmico de fornos de recozimento em caixa de bobinas laminadas a frio. Praticamente não há nenhuma referência bibliográfica específica sobre o assunto, somente referências indiretas a esse cálculo. Este é um caso bastante específico de balanço térmico, pois geralmente este cálculo é efetuado para fornos que apresentam operação contínua, como nos casos já vistos neste trabalho. Já o proces-

so de recozimento em caixa é descontínuo; seu ciclo é composto do aquecimento das bobinas laminadas a frio até a temperatura de recozimento (entre 600 e 700°C), seguida de resfriamento lento da carga. Seu aquecimento na COSIPA é feito através da combustão de gás natural puro.

Decidiu-se aqui fazer o balanço térmico da fase mais crítica do processo, ou seja o aquecimento das bobinas a frio. Este fato obriga a uma modificação no balanço térmico, que agora deve levar em conta a quantidade de calor necessária ao aquecimento de toda a carcaça do forno até a temperatura de trabalho [5,6]. Geralmente isso não é necessário no balanço térmico de fornos contínuos, uma vez que se assume que o forno está trabalhando de forma estacionária durante a coleta dos dados necessários.

Decidiu-se fazer o balanço térmico na linha de recozimento #5 da COSIPA, a qual foi recentemente implantada e dispõe de modernos fornos de alta convecção, que usam hidrogênio como atmosfera protetiva. Essa característica acelera a transferência de calor entre as bobinas de aço e a atmosfera circundante, aumentando a produtividade do processo. Além disso, uma das bases dessa linha é completamente instrumentada, o que facilitou enormemente o trabalho de coleta de dados e proporcionou excepcional precisão aos dados coletados.

Neste tipo de forno também há a injeção contínua de uma atmosfera protetiva, que é constituída de hidrogênio puro. Contudo, ao contrário do observado no forno de tratamento térmico para chapas grossas, esse fluxo de hidrogênio não rouba calor do forno, pois ao sair do interior da campânula ele é direcionado para um queimador específico junto aos outros queimadores de gás natural. Ou seja: não só o calor absorvido pelo hidrogênio volta para o forno, como também ele contribui para seu aquecimento através de sua queima. Dessa forma, o hidrogênio acaba tendo um duplo papel aqui: proteção da superfície das bobinas a frio e coadjuvante do aporte térmico.

Em resumo, as contribuições para este balanço térmico decorrem da combustão do gás natural/atmosfera protetiva e do calor sensível do ar de combustão pré-aquecido. Já as retiradas de calor ocorrem através do aquecimento das bobinas de aço, o calor sensível dos fumos, a refrigeração por água da ventoinha da base, o calor irradiado pelas paredes e o calor absorvido pela carcaça do forno durante o aquecimento das bobinas a frio. Todos os dados necessários de temperatura e vazão foram adquiridos e armazenados automaticamente em computador ao longo das 16 horas que durou a fase de aquecimento.

A tabela IV mostra os resultados de um dos balanços térmicos efetuados. Como era de se esperar, a maior parte do aporte térmico veio da combustão do gás natural, que respondeu por 81%. O pré-aquecimento do ar combustão contribuiu com outros 15% e a combustão do hidrogênio com 4%. Note-se que a queima de hidrogênio gerou 4,8 Mcal/t de aço, contribuindo para reduzir o custo do recozimento em R\$ 0,19/t de aço. Por outro lado, do ponto de vista da demanda térmica, note-se que 62% do calor fornecido foi transferido para as bobinas de aço, um percentual bem maior do que o observado para os fornos de reaquecimento e tratamento térmico. Tal fato pode ser explicado pela alta convecção do hidrogênio usado como atmosfera protetiva. Os fumos levaram 33% do calor fornecido. As demais perdas térmicas foram bem pequenas, como o calor extraído pela refrigeração forçada da ventoinha do forno (2,9%), o irradiado pelas paredes (2,3%) e o absorvido pela carcaça do forno (0,5%).

Como se trata de um equipamento bastante moderno, instalado há poucos anos, fica difícil propor melhorias energéticas a ele. Como sempre, uma primeira sugestão para economia de energia seria aumentar o calor sensível do ar de combustão, reduzindo o calor extraído pelos fumos da chaminé. Contudo, a temperatura do ar para combustão já é bastante alta, da ordem de 450°C, típica de um forno de recozimento no estado da arte. As

demais perdas - calor extraído pela refrigeração da ventoinha, irradiado pelas paredes e absorvido pela carcaça do forno - correspondem a um custo total de R\$ 0,27 por tonelada de aço, o que torna duvidoso o retorno dos investimentos que seriam necessários para diminuí-las. Realmente a única sugestão aqui é garantir que a manutenção do equipamento seja feita de forma rigorosa, garantindo seu desempenho atual.

ENTRADAS DE CALOR	Mcal/ t aço	%
Calor Combustão do Gás	102,8	81,0
Calor Combustão do H ₂	4,8	3,8
Calor Sensível do Ar	19,3	15,2
TOTAL	126,9	100

SAÍDAS DE CALOR	Mcal/ t aço	%
Calor Absorvido pela Carga	78,5	61,9
Calor Sensível Fumos	41,6	32,8
Calor Extraído Refrigeração	3,7	2,9
Calor Perdido Paredes	2,9	2,3
Calor Absorvido Forno	0,5	0,5
Outros	-0,3	-0,3
TOTAL	126,9	100

Tabela IV: Resultado de um balanço térmico efetuado para o forno de recozimento em caixa de alta convecção da COSIPA.

Foram realizados outros balanços térmicos sob condições de processo ligeiramente diferentes para se verificar o efeito no balanço térmico do forno de recozimento. Por exemplo, num dos casos a carcaça do forno estava um pouco mais aquecida do que o normal: 70 a 75°C, quando o normal é de 30 a 35°C. O ganho energético foi mínimo, com o calor absorvido pela carcaça do forno caindo de 0,5 para 0,1 Mcal/t de aço, uma economia de apenas R\$ 0,015/t de aço.

Em outra oportunidade foi feito o balanço térmico de um ciclo de recozimento com dois patamares de isotérmicos durante o aquecimento, prática usual para se melhorar o grau de limpeza superficial das bobinas laminadas a frio. Isso prolongou o tempo de aquecimento de 16 para 25,5 horas. O resultado do balanço térmico mostrou que a quantidade de calor absorvida pelas bobinas fica praticamente constante e que houve uma redução na vazão de gás natural fornecido para a combustão, ao contrário do hidrogênio usado como atmosfera protetiva, cujo volume se manteve constante. Ou seja, a participação da queima do hidrogênio da atmosfera protetiva no aporte térmico do forno aumentou de 4,5 para 12,1 Mcal/t. Por outro lado, a redução na vazão de gás natural provocou diminuição na quantidade e temperatura dos fumos de combustão, o que se refletiu numa diminuição da contribuição proporcionada pelo pré-aquecimento do ar de combustão, que caiu de 19,6 para 18,3 Mcal/t. Ainda assim houve economia de gás natural, cuja contribuição caiu de 113,3 para 110,5 Mcal/t, promovendo uma economia "involuntária" de R\$ 0,11/t.

- CONCLUSÕES

O cálculo periódico do balanço térmico dos fornos usados nos processos de laminação, desde que feito a partir de dados fidedignos e com um mínimo de hipóteses simplificadoras, permite um diagnóstico energético bastante detalhado desses equipamentos, conforme foi mostrado nos casos expostos neste trabalho. A facilidade atual em termos de instrumentação, aquisição e processamento digital de dados permite automatizar com facilidade esse procedimento, tornando-o um instrumento rotineiro para o controle de processos que envolvam aquecimento.

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDRADE, H.L. e outros. Metalurgia ABM, Janeiro 1983, 27-31.
2. FERRAZ, M.J.O. (editor). Curso de Laminação dos Aços. ABM, São Paulo, 1981.
3. MACHADO, A.C. (editor). Curso de Sistema de Energia na Siderurgia. ABM, São Paulo, 1984.
4. BRUNO, S.L. Balanço Térmico do Forno de Reaquecimento nº 2 da Linha de Chapas Grossas. In: VI Simpósio Interno de Laminação, COSIPA, Cubatão, 16 a 19 de Maio de 1983.
5. BRACHET, P. Fours Discontinus de Traitement Thermique. Publication CESSID 77-39, Mars 1977.
6. HEIDEMANN, M. Fours de Rechauffage - Etablissement de Bilans Thermiques Globaux et Etages dans le Temps. Cas de Fours Discontinus: Four Pits. Publication CESSID 77-02, Juillet 1976.

PERFORMANCE ANALYSIS OF FURNACES USED IN HOT ROLLING AND HEAT TREATMENT PLANTS THROUGH HEAT BALANCE ¹

Antonio Augusto Gorni ²
Maurício Martins Pereira ³
Guilherme Klaus Pfeitsticker ⁴
Robson Rodrigues Fialho ⁵
Lúcio Rosa da Silva ⁶
Paulo Freire Jr. ⁷

ABSTRACT

Since the 1970's energy savings is a top theme for activities regarding minimization of industrial costs, as a reaction against oil shocks, electricity shortage or a more sensitive public ecological awareness. The calculation of realistic heat balances, using reliable data and without oversimplifications, offers a very efficient diagnosis tool to assess the energetic performance of furnaces. Its results allow the identification of economically feasible activities for energy savings and rank them. This paper shows heat balance calculations for several furnaces used in steel flat products processing, including steel plate heat treatment and batch annealing furnaces, cases where apparently heat balance calculation is not common practice.

Keywords: Heat Balance, Energy Savings, Hot Rolling Furnaces

¹ Paper to be presented in the XXIV Seminar About Global Energetic Balances and Utilities, Brazilian Association for Metallurgy and Materials, August 6 to 8, 2002, São Paulo, Brazil.

² Materials Engineer, M. Eng., D. Eng., Process Analyst of the Hot Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

³ Metallurgical Engineer, Process Analyst of the Hot Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁴ Metallurgical Engineer, Process Analyst of the Cold Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁵ Metallurgical Technician, Steel Plate Heat Treatment Foreman, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁶ Metallurgical Technician, Operation Assistant of the Cold Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁷ Instrumentation Technician, Electric Inspection Foreman of the Batch Annealing Furnace and Temper Mill, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.