

BALANÇO TÉRMICO DE FORNOS PARA RECOZIMENTO EM CAIXA DE BOBINAS LAMINADAS A FRIO ¹

Antonio Augusto Gorni ²
Guilherme Klaus Pfeilsticker ³
Lúcio Rosa da Silva ⁴
Paulo Freire Jr. ⁵

RESUMO

O balanço térmico de um forno é uma poderosa ferramenta que permite avaliar seu desempenho energético, identificando seus principais pontos fortes e fracos sob esse ponto de vista. Enquanto o cálculo do balanço térmico é comum no caso de altos-fornos, conversores LD e fornos de reaquecimento de placas, ele é muito pouco aplicado no caso de fornos para tratamento térmico, especialmente os fornos para recozimento em caixa de bobinas laminadas a frio. Este trabalho teve como objetivo, desenvolver a metodologia para a coleta de dados e o algoritmo para o cálculo do balanço térmico dos fornos de recozimento em caixa de alta convecção da COSIPA, tendo sido usado para se determinar o desempenho térmico de diversas variantes desse processo. Uma das principais constatações foi o fato de que o pré-aquecimento do ar de combustão proporciona uma economia considerável de energia. Este fato está motivando a execução de estudos visando a implantação desse recurso em fornos antigos que ainda não dispõem desse recurso.

Palavras-Chave: Balanço Térmico, Economia de Energia, Fornos de Recozimento em Caixa

¹ Trabalho a ser apresentado ao 58º Congresso Anual da ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Rio de Janeiro RJ, 21 a 24 de Julho de 2003.

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 Frio, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁴ Técnico Metalurgista, Assistente de Operação da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Frio da COSIPA, Cubatão SP.

⁵ Técnico Instrumentista, Líder de Inspeção Elétrica da Gerência de Recozimento e Encruamento, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

- INTRODUÇÃO

O balanço térmico é uma das ferramentas mais eficazes para se diagnosticar o nível de desempenho energético conseguido pelos 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 ele é vital ao processo metalúrgico. Em outras aplicações, como no caso dos fornos para reaquecimento de placas, ele não é imprescindível para a operação do equipamento, mas ainda assim pode proporcionar informações muito úteis para a maximização de sua eficiência energética. Contudo, praticamente não há informações na literatura sobre a execução de balanços térmicos no caso de fornos para tratamento térmico, como os usados no recozimento em caixa de bobinas de aço laminadas a frio. Isso provavelmente decorre do fato, de que a quantidade de energia envolvida nesses casos é muito menor do que nos outros fornos a montante do processo siderúrgico. Ainda assim perde-se uma excelente oportunidade para se fazer uma auditoria contínua nesses processos 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 à determinação das quantidades de calor envolvidas. É bem verdade que essas medições podem ser penosas, demoradas e caras, mas a quantidade de hipóteses e dados teóricos deve ser mínima para se garantir que o balanço térmico não seja apenas um mero exercício de ficção.

A COSIPA, não somente em função da necessidade de melhoria contínua de seus processos industriais, mas preocupada com a racionalização do uso de seus insumos energéticos, e conseqüentemente com a qualidade de seu meio ambiente, decidiu implantar a execução rotineira de balanços térmicos nos fornos de suas áreas de laminação. O objetivo imediato desse trabalho consiste em identificar suas deficiências do ponto de vista energético e priorizar sua correção em função dos resultados obtidos [1]. Foi incluída nesse esforço a análise do desempenho energético dos fornos para recozimento em caixa de bobinas laminadas a frio. Ao se iniciar o desenvolvimento do algoritmo para o cálculo do balanço térmico desse equipamento, constatou-se que raras eram as referências bibliográficas sobre esse assunto, e todas de acesso bastante restrito [2,3]. Portanto, houve a necessidade de se criar uma metodologia própria para o cálculo desse balanço térmico, adequada às peculiaridades do equipamento disponível.

- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O primeiro passo para se iniciar o procedimento para determinação do balanço térmico de um forno consiste em compreender adequadamente o seu processo. No caso específico do forno de recozimento em caixa de bobinas a frio aqui estudado, o qual pode ser visto esquematicamente na figura 1, o aquecimento é produzido pela queima de gás natural. O processo inicia-se com as bobinas a frio sendo empilhadas sobre uma base fixa, dotada de uma ventoinha central. Essa ventoinha, refrigerada a água, tem como objetivo recircular a atmosfera protetiva que protege a superfície das

bobinas contra a oxidação promovida pelas temperaturas relativamente altas que caracterizam o tratamento térmico de recozimento. Após o empilhamento de todas as bobinas sobre a base é colocado um abafador, ou seja, uma campânula de proteção sobre as mesmas, para evitar seu contato com os gases gerados pela combustão. A seguir é injetado no interior do abafador um fluxo gasoso que serve de atmosfera protetiva contra a oxidação, e que também intensifica a transferência de calor por convecção entre o abafador e as bobinas. Posiciona-se então um forno do tipo sino sobre o conjunto abafador + carga.

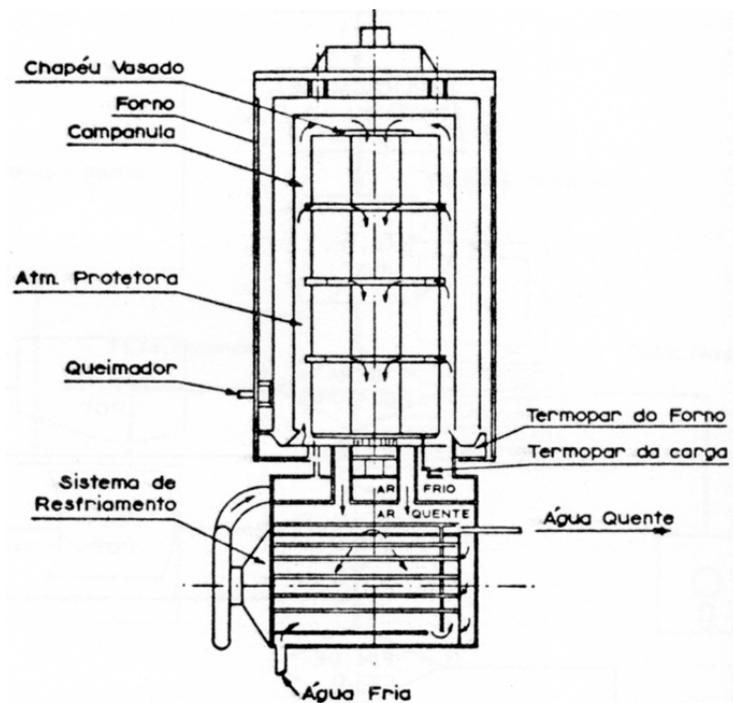


Figura 1: Diagrama esquemático de um forno para recozimento em caixa de bobinas de aço laminadas a frio.

O processo de aquecimento da carga é iniciado, ao mesmo tempo que a ventoinha para recirculação da atmosfera protetiva é ligada. Basicamente a carga é aquecida até que atinja sua temperatura adequada para recozimento, que está na faixa entre 590 a 660°C, conforme o tipo de produto. Esse processo é relativamente longo, podendo levar de 15 a 20 horas. Um termopar existente na base da pilha de bobinas monitora continuamente a temperatura, permitindo que se saiba quando o valor desejado foi alcançado. Após ser alcançada a temperatura objetivada de recozimento a carga é mantida sob tais condições por mais um certo período de tempo, que varia de 3 a 5 horas.

Uma vez cumprida essa fase de encharque, os queimadores são desligados e o forno-sino é retirado da base, iniciando-se o resfriamento da carga. Depois de algumas horas de resfriamento, é colocada sobre o abafador uma campânula de resfriamento ou resfriador, dotada de quatro ventiladores tangenciais. Nesse mesmo momento também

é ligado um sistema de recirculação com resfriamento da atmosfera protetiva, que está localizado sob a base. Esses dois sistemas aceleram o resfriamento da carga. Assim que a carga atinge uma temperatura adequadamente baixa - da ordem de 100°C - são retirados o resfriador e o abafador; também são desligados a ventoinha para recirculação e o sistema de resfriamento de atmosfera protetiva sob a base; a carga de bobinas já está recozida e pronta para desenformamento.

Somente a fase de aquecimento e encharque da carga é relevante para efeito de balanço térmico; logo, decidiu-se considerar somente essa etapa de processo nesta análise. Foram escolhidos para essa diagnose os novos fornos de recozimento em caixa da COSIPA, que usam hidrogênio como atmosfera protetiva. Esse gás caracteriza-se por apresentar alta convecção, maximizando a transferência de calor entre a parede do abafador e as bobinas que estão sendo recozidas, encurtando o tempo necessário para o processo de recozimento. Além disso, esses novos fornos são altamente instrumentados e dispõem de coleta digital de dados controlada por microcomputador, o que facilitou o processo de aquisição de dados e garantiu sua precisão e representatividade.

A análise do equipamento e do processo aplicado permitiu identificar as seguintes fontes de calor para o aquecimento das bobinas laminadas a frio:

- Combustão de gás natural;
- Ar pré-aquecido para a combustão;
- Queima da atmosfera protetiva (hidrogênio puro).

Note-se aqui uma característica peculiar aos fornos de recozimento em caixa de bobinas a frio com alta convecção: a atmosfera de hidrogênio puro é queimada no próprio forno após sair do interior do abafador, contribuindo para a matriz energética que abastece esse forno. Os diversos cálculos ligados à combustão, como a determinação da energia fornecida e os respectivos volumes e composições dos gases envolvidos nessa reação, bem como do calor latente proporcionado pelo ar pré-aquecido, foram feitos usando-se os algoritmos e dados constantes em diversas referências [4-7].

A mesma análise revelou as seguintes saídas de calor:

- Aquecimento da carga;
- Calor sensível dos fumos da combustão;
- Calor extraído pela água que refrigera a ventoinha;
- Calor irradiado pelas paredes do forno;
- Calor absorvido pelo forno.

Os três primeiros itens podem ser calculados em função da diferença de temperatura observada, da massa e do calor específico da carga de bobinas de aço, fumos da combustão e água de refrigeração, respectivamente. O calor perdido pelas paredes do forno foi estimado através de equações de transferência de calor, assumindo-se a geometria cilíndrica do forno e as temperaturas de sua carcaça externa [5,6]. Foi necessário incluir nesta análise o calor absorvido pelo forno, uma vez que o processo de aquecimento é descontínuo e inicia-se com o forno e sua carcaça sob temperaturas próximas às do ambiente, ao contrário do que ocorre em fornos contínuos, onde a

temperatura da carcaça do forno é considerada constante [1]. Note-se ainda que, a rigor, deveria ser considerada a perda de calor decorrente da saída da atmosfera protetiva aquecida do forno. Contudo, essa contribuição para a demanda térmica é anulada, uma vez que esse fluxo é redirecionado ao forno para queima, momento em que esse calor latente é reintroduzido no sistema.

Os dados, necessários ao cálculo das diversas parcelas do balanço térmico, foram medidos ao longo de ciclos de recozimento selecionados, usando-se uma base especialmente instrumentada para esse fim. Foram periodicamente registrados os seguintes parâmetros ao longo da fase de aquecimento do ciclo de recozimento, sob intervalo de cinco minutos:

- Temperatura do forno [°C];
- Temperatura da base [°C];
- Temperatura da água de refrigeração na entrada da ventoinha [°C];
- Temperatura da água de refrigeração na saída da ventoinha [°C];
- Temperatura do ar para combustão na entrada do recuperador [°C];
- Temperatura do ar para combustão na saída do recuperador [°C];
- Temperatura dos fumos na entrada do recuperador [°C];
- Temperatura dos fumos na saída do recuperador [°C];
- Temperatura de dois pontos da carcaça externa do forno [°C];
- Vazão de gás natural [m³/h];
- Vazão de ar para combustão [m³/h];
- Vazão de hidrogênio usado como atmosfera protetiva [m³/h];
- Vazão da água para refrigeração da ventoinha [m³/h].

Outros dados necessários para o balanço térmico e que foram considerados fixos durante a fase de aquecimento estão listados a seguir:

- Composição química [%] e PCI [kcal/Nm³] reais do gás natural;
- Umidade relativa do ar [%];
- Temperatura ambiente [°C];
- Temperatura inicial da carga [°C];
- Peso da carga [kg];
- Teor de oxigênio nos fumos (assumido valor teórico) [%];
- Dimensões do forno (altura e diâmetro) [m].

Esses dados alimentaram o algoritmo para cálculo do balanço térmico do forno de recozimento em caixa de bobinas a frio, o qual foi programado em linguagem Visual Basic; a entrada e a saída de dados foram registradas através de planilhas Excel.

Foram realizados três balanços térmicos com o objetivo de se determinar o desempenho energético do forno de recozimento em caixa em três situações típicas de sua operação:

- Ciclo normal, forno frio;
- Ciclo normal, forno quente;
- Ciclo com patamar durante aquecimento para melhoria da limpeza superficial.

- RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela I mostra os resultados do balanço térmico efetuado para um ciclo normal e forno frio no início do processo (35°C); a temperatura de recozimento das bobinas foi de 590°C, alcançada depois de 16 horas de aquecimento. Como era previsto, a maior parte do aporte térmico veio da combustão do gás natural, que respondeu por 81% do total. 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 bobina a frio. Considerando-se um custo de R\$ 38,50 por Gcal gerada pela queima do gás combustível, a queima da atmosfera protetiva contribuiu para reduzir o custo do recozimento em R\$ 0,19/t de bobina a frio. Do ponto de vista da demanda térmica deve-se notar 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 [1]. 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%). A parcela relativa a "Outras Perdas" - na verdade, uma parcela de conciliação que reflete o erro associado ao cálculo do balanço térmico - foi praticamente desprezível, da ordem de 0,3%.

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

SAÍDAS DE CALOR	Mcal/ t BF	%
Absorvido pela Carga	78,5	61,9
Perdido pelos Fumos	41,6	32,8
Perdido por Refrigeração	3,7	2,9
Perdido pelas Paredes	2,9	2,3
Absorvido pelo Forno	0,5	0,5
Outros	-0,3	-0,3
TOTAL	126,9	100

Tabela I: Resultado de um balanço térmico efetuado para o forno de recozimento em caixa de alta convecção da COSIPA. Ciclo normal, forno inicialmente frio (35°C).

Os resultados do balanço térmico feito para o forno de recozimento em caixa de bobinas a frio para um ciclo normal e forno aquecido no início do processo (75°C) podem ser vistos na Tabela II. Pode-se observar que o uso do forno quente representou uma economia desprezível em termos de energia: a perda térmica decorrente do aquecimento da carcaça do forno ficou em aproximadamente 0,1 Mcal/t bobina, 20% do valor observado quando o processo se iniciou com o forno frio (35°C). A economia obtida também é mínima, da ordem de R\$ 0,015/t de bobina a frio. Na verdade, a demanda térmica observada nesse segundo caso foi 8,2% superior ao do primeiro caso, já que aqui a carga de bobinas foi recozida sob uma temperatura de 640°C, superior à do caso anterior, onde ela foi igual a 590°C.

ENTRADAS DE CALOR	Mcal/ t BF	%
Combustão do Gás	113,3	82,5
Combustão do H ₂	4,5	3,3
Ar para Combustão	19,6	14,2
TOTAL	137,3	100

SAÍDAS DE CALOR	Mcal/ t BF	%
Absorvido pela Carga	86,9	63,2
Perdido pelos Fumos	41,7	30,4
Perdido por Refrigeração	4,0	2,9
Perdido pelas Paredes	4,2	3,1
Absorvido pelo Forno	0,1	0,1
Outros	0,4	0,3
TOTAL	137,3	100

Tabela II: Resultado de um balanço térmico efetuado para o forno de recozimento em caixa de alta convecção da COSIPA. Ciclo normal, forno inicialmente quente (75°C).

Em outra oportunidade foi feito o balanço térmico de um ciclo de recozimento com patamar isotérmico seguido de rampa suave de curta duração durante o aquecimento. Esta prática é usual quando se deseja maximizar o grau de limpeza superficial das bobinas laminadas a frio. A temperatura de recozimento usada foi de 660°C. Esse procedimento prolongou o tempo de aquecimento de 16 para 25,5 horas. O resultado do balanço térmico - mostrado na Tabela III - mostrou que a quantidade de calor absorvida pelas bobinas fica praticamente constante, como se esperava. Houve ainda redução na vazão de gás natural fornecido para a combustão, ao contrário do hidrogênio usado como atmosfera protetiva, cuja vazão manteve-se 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.

Como o equipamento estudado é bastante moderno, tendo sido instalado há poucos anos, tornou-se tecnicamente insustentável, a partir dos resultados obtidos nos balanços térmicos, propor melhorias energéticas no mesmo. Dessa forma, uma primeira recomendação para se economizar energia seria aumentar ainda mais o calor sensível do ar de combustão, maximizando o calor extraído a partir dos fumos de combustão. Contudo, a temperatura do ar para combustão já está bastante alta, da ordem de 450°C, típica de um forno de recozimento no atual 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 bobina a frio, o que torna duvidoso o retorno dos investimentos, que seriam necessários para diminuí-las. Consequentemente, a única alternativa foi garantir que a manutenção do equipamento seja feita de forma rigorosa, assegurando que seus níveis de desempenho atuais sejam mantidos.

Os balanços térmicos aqui efetuados mostraram que o aporte térmico proporcionado pelo ar de combustão pré-aquecido é apreciável, da ordem de 13 a 15% da termia necessária ao processo. Esse valor foi confirmado em trabalho anterior

desenvolvido na COSIPA [8], que apontava uma melhoria de rendimento da combustão da ordem de 10%. Esse resultado, confirmado no presente trabalho, motivou a realização de estudos visando constatar a viabilidade de se implantar o pré-aquecimento do ar para combustão em outras linhas de recozimento em caixa da COSIPA, que ainda não contam com esse recurso.

ENTRADAS DE CALOR	Mcal/ t BF	%
Combustão do Gás	110,5	78,4
Combustão do H ₂	12,1	8,6
Ar para Combustão	18,3	13,0
TOTAL	141,0	100

SAÍDAS DE CALOR	Mcal/ t BF	%
Absorvido pela Carga	92,3	65,4
Perdido pelos Fumos	36,2	25,7
Perdido por Refrigeração	5,9	4,2
Perdido pelas Paredes	3,8	2,7
Absorvido pelo Forno	0,5	0,5
Outros	2,4	1,7
TOTAL	141,0	100

Tabela III: Resultado de um balanço térmico efetuado para o forno de recozimento em caixa de alta convecção da COSIPA. Ciclo especial com patamar visando maximizar limpeza superficial das bobinas a frio.

- CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo desenvolver a metodologia para coleta de dados e o algoritmo para o cálculo do balanço térmico de fornos para recozimento em caixa de bobinas a frio, um procedimento muito pouco documentado na literatura especializada. Os resultados obtidos a partir do cálculo do balanço térmico para fornos de recozimento em caixa de alta convecção na COSIPA demonstraram a alta eficiência desses equipamentos relativamente novos. Ficou particularmente demonstrado o papel de destaque que o uso de ar para combustão pré-aquecido tem no aumento da eficiência energética desse equipamento. Esses resultados estão motivando o desenvolvimento de estudos visando verificar a viabilidade de se adotar esse recurso nos antigos fornos para recozimento em caixa da COSIPA, onde ainda não se encontra disponível.

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GORNI, A.A. e outros. XXIV Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2002.
2. HAUCK, G.A.C. & ALÉ, R.M. Balanço Térmico do Forno de Recozimento em Caixa. Seminário Interno da USIMINAS, Setembro de 1980.

3. BRANCHINI, O.L.G. Balanço Energético de uma Instalação de Fornos de Recozimento de Bobinas. Seminário de Pós-Graduação, Escola Politécnica da U.S.P., Maio de 1986.
4. BRACHET, P. Fours Discontinus de Traitement Thermique. Publication CESSID 77-39, Mars 1977.
5. FERRAZ, M.J.O. (editor). Curso de Laminação dos Aços. ABM, São Paulo, 1981.
6. MACHADO, A.C. (editor). Curso de Sistema de Energia na Siderurgia. ABM, São Paulo, 1984.
7. HEIDEMANN, M. Fours de Rechaufage - Etablissement de Bilans Thermiques Globaux et Etages dans le Temps. Cas de Fours Discontinus: Four Pits. Publication CESSID 77-02, Juillet 1976.
8. CARMO, E.J. e outros. Reaproveitamento de Calor dos Gases Queimados para Pré-Aquecimento do Ar de Combustão para os Fornos de Recozimento de Bobinas nº 1 e 2. Simpósio Interno de Manutenção, Projetos, Solda e Automação da COSIPA, Setembro 1982.

HEAT BALANCE OF BATCH ANNEALING FURNACES ¹

Antonio Augusto Gorni ²
Guilherme Klaus Pfeilsticker ³
Lúcio Rosa da Silva ⁴
Paulo Freire Jr. ⁵

ABSTRACT

The heat balance of a furnace is a powerful tool which allows the evaluation of its thermal performance and to identify its main strong and weak points from this point of view. While the heat balance calculation is common for blast furnaces, basic oxygen furnaces and slab reheating furnaces, it is rarely applied for heat treating furnaces, specially for batch annealing furnaces. The aim of this work was to develop the data collection methodology and the algorithm for the calculation of the heat balance of the high convection batch annealing furnaces of COSIPA. Several heat balances were calculated in this manner in order to evaluate the energy efficiency of some annealing process variants used in this steelworks. One of the main findings was the fact that pre-heating of the combustion air promoted significant energy savings. Studies are being carried out nowadays in order to allow the use of pre-heated combustion air in older batch annealing furnaces, that still operate with cold combustion air.

Keywords: Heat Balance, Energy Savings, Batch Annealing Furnaces

¹ Paper to be presented in the 58th Annual Congress of the Brazilian Association for Metallurgy and Materials, July 21 to 24, 2003, Rio de Janeiro, 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 Cold Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁴ Metallurgical Technician, Operation Assistant of the Cold Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁵ Instrumentation Technician, Electric Inspection Foreman of the Batch Annealing Furnace and Temper Mill, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.