

IBA
Luis

-411-

CORRELAÇÃO MATEMÁTICA ENTRE AS TEMPERATURAS DE UMA
CARGA EM FORNOS DE RECOZIMENTO DE BOBINAS (1)

Oswaldo Luís G. Branchini (2)
Antonio Augusto Gorni (3)

R E S U M O

Foram medidas as temperaturas de uma carga de bobinas submetidas a recozimento em caixa de 14 pontos selecionados. Verificou-se a existência de pontos quentes e frios na carga, os quais criam um gradiente de temperatura e promovem uma dispersão no grau de recristalização nos diversos pontos da carga. Este fato leva a variação das propriedades mecânicas do material. Foram determinadas equações estatísticas visando correlacionar o tempo de processo e temperatura de controle da carga com as temperaturas dos pontos quentes e frios.

- (1) Contribuição Técnica à COLAM para ser apresentada no 43º Congresso Anual da ABM, outubro de 1988 em Belo Horizonte - MG.
- (2) Engenheiro de Desenvolvimento da Gerência de Laminação da COSIPA.
- (3) Engenheiro de Pesquisa do Núcleo de Pesquisas Tecnológicas da COSIPA.

T0042033

1 - INTRODUÇÃO

O processo de recozimento de bobinas no fluxo siderúrgico está situado entre a laminação a frio e o processo de laminação de encruamento.

O processo de recozimento visa promover a recristalização do material altamente encruado na laminação a frio, através do aquecimento lento de um grupo de bobinas em fornos tipo campânula.

O tratamento de recozimento de bobinas consiste em se empilhar de duas a seis bobinas sobre uma base fixa.

O conjunto de bobinas denomina-se carga de recozimento. Sobre a carga é colocada uma campânula de aço inoxidável para evitar o contato dos gases de queima e do ar com a carga, pois isso provocaria a oxidação superficial do material.

Esse processo provoca um aquecimento lento e com velocidade diferente nos diversos pontos de uma mesma bobina, bem como de uma bobina para outra.

Este fato peculiar do processo cria uma dispersão das caracteristicas mecânico/metalúrgicas do material, pois cada região terá uma história térmica diferente.

O ciclo de recozimento é feito obedecendo os seguintes parâmetros:

- tempo total de aquecimento: 36 hs
- tempo de encharque : 10 hs
- temperatura de encharque : 690°C

Após o cumprimento desses parâmetros o forno é retirado e é iniciado o processo de resfriamento que segue os seguintes parâmetros:

- tempo total de resfriamento : 45 hs
- temperatura de descarregamento: 90°C

Os parâmetros acima citados valem para uma carga constituída de material para aplicação em estampagem extra-profunda.

O processo de aquecimento lento faz com que o material encruado sofra um processo contínuo de recuperação, recuperação/recristalização e recristalização promovendo a formação de uma estrutura ferrítica recristalizada.

Esta estrutura apresenta características diferentes daquelas obtidas no aquecimento brusco até a temperatura de tratamento, onde ocorria a recristalização diretamente da estrutura altamente encruada.

2 - PREPARAÇÃO DA CARGA E INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

As bobinas para a experiência em questão foram escolhidas de forma a terem diâmetros e largura aproximadas entre si, de sorte a criar uma carga típica, com ciclo de recozimento tipo qualidade comum e menor exigência superficial, pois elas continuariam o ciclo normal de produção e não deveriam surgir defeitos devido a realização da experiência.

Os dados das bobinas selecionadas estão na tabela I.

Posição	Número	Dimensões (mm)	Produto	Peso (kg)	Superfície	Qualidade (SAE)
1	311374	1,90 x 1000	BF	19745	S3	1006
2	301640	0,75 x 1100	BF	20345	S3	943
3	301641	0,75 x 1100	BF	20360	S3	943
4	301643	0,75 x 1100	BF	20335	S3	943

Tabela I - Dados das Bobinas Selecionadas para a Experiência

Durante a operação de laminação a frio foram colocados três calços entre as espiras situados aproximadamente a 50, 250 e 450 mm do diâmetro externo nas 4 bobinas pré-selecionadas.

A base selecionada foi preparada para permitir a colocação de 12 termopares no interior das bobinas, além de termopares rotineiros de controle de temperatura da carga e do forno.

Após a colocação da primeira bobina foi colocado um termopar ao lado de cada um dos calços, atingindo metade da largura da bobina (500 mm).

Essa operação se repetiu até a colocação da última bobina.

Os termopares utilizados eram do tipo Cromel-Alumel com isolamento mineral, medindo 6.000 mm de comprimento e 3 mm de diâmetro.

O conjunto de 12 termopares (T01 a T12) colocados no interior das espiras saiam do sistema base/campânula através da carcaça da base, mantendo uma vedação perfeita no sistema. Esses termopares foram conectados a um registrador de 12 canais.

Por sua vez, os termopares de controle são do tipo Ferro-Constantan com isolamento mineral, medindo 800 mm e 6 mm de diâmetro. Eles saem da base por orifício próprio e são conectados a um registrador de dois canais (figura 01).

Especialmente neste caso foram registrados os 14 pontos de temperatura da carga durante todo ciclo de aquecimento e resfriamento, totalizando aproximadamente 70 horas.

3 - DADOS OBTIDOS

Os dados obtidos através dos registradores gráficos foram trasladados para um micro-computador com intervalos de 15 min. para se efetuar as correlações matemáticas entre os dados de temperatura dos 14 termopares.

Neste trabalho é mostrada a evolução da temperatura ao longo do tempo dos dois pontos mais significativos da carga: T01 (ponto quente) na figura 1 e T08 (ponto frio) na figura 3, juntamente com a temperatura de controle do forno (T13).

Observou-se que um grupo de temperaturas - T01, T05, T07, T10 - está acima da temperatura de controle no final do ciclo de aquecimento. Tais temperaturas são os chamados pontos quentes da carga. Outro grupo de temperaturas - T02, T03, T06, T08, T09, T11, T12 - durante o ciclo de aquecimento está sempre abaixo da temperatura de controle. Tal situação se inverte no resfriamento. Dentro deste grupo há um sub-grupo, T08 e T09.

Durante o resfriamento ocorre uma inversão entre os pontos quentes e os pontos frios, devido ao fato de que tanto o fornecimento como a extração de calor têm velocidades maiores nas mesmas regiões (pontos quentes no aquecimento) e menores em outras (pontos frios no aquecimento).

A temperatura T04 apresenta-se totalmente desvinculada da temperatura de controle, pois neste caso o termopar não foi inserido no interior da espira, mas colocado na superfície externa da bobina na região fronteira aos queimadores do forno. Por tal motivo sofre grande influência da radiação da campânula de proteção que atinge temperaturas superiores a 900°C logo ao se iniciar o processo.

Esta temperatura mostrou-se muito variável nas etapas onde o forno entrava em controle (patamar intermediário e encharque final) e sensível a qualquer oscilação do controle do forno. Este caso foi descartado para qualquer tipo de análise pois não é representativo do processo, visto que somente a espira externa da carga sofre tal tipo de ciclo de aquecimento e resfriamento. Tal região é descartada no processo seguinte, na laminação de encruamento.

A temperatura de controle do forno (T14) também foi desprezada pelos mesmos motivos. Tal parâmetro é utilizado como temperatura de referência do forno, pois o controle do ciclo é feito através da temperatura de controle da carga (T13).

Percebe-se uma diminuição da diferença de temperatura entre T13 e T08 no início e final de patamar intermediário, passando de 264 para 142°C; o mesmo ocorrendo entre T13 e T01 que passa de 144 para 10°C.

A existência do patamar não impede o aumento em 12°C da diferença de temperatura entre ponto quente e ponto frio, passando de 120 para 132°C. Este aumento é provocado pelas acentuadas diferenças de velocidade de aquecimento entre as duas regiões.

Um dado importante a ser apresentado é a diferença de temperatura entre os pontos quentes e frios no final de encharque, para o caso 108°C (T01 = 666°C, T08 = 558°C).

Este nível de gradiente térmico é um dos problemas existentes neste tipo de equipamento e para diminuí-lo deve-se aumentar o tempo de encharque e o tempo total de aquecimento, que deve ser ponderado com a produtividade envolvida e a qualidade requerida.

No início de encharque tem-se as seguintes diferenças de temperatura entre T13 e T01, T13 e T08, e T01 e T08: 16, 148 e 132°C, respectivamente; no final de encharque tem-se: 26, 82 e 108°C, respectivamente. A diferença de temperatura negativa apresentada entre T13 e T01 mostra que no final de encharque as temperaturas dos pontos quentes, T01 = T05 = T07 = T10 = 666°C são maiores que a temperatura de controle, T13 = 640°C (tabela II).

		T13	T01	Dif	T13	T08	Dif	T01	T08	Dif
patamar	início	444	300	144	444	180	264	300	180	120
	final	490	480	10	490	348	142	480	348	132
encharque	início	640	624	16	640	492	148	624	492	132
	final	640	666	-26	640	558	82	666	558	108

Tabela II - Diferenças de temperatura entre pontos quentes, frios e de controle (°C).

Durante o resfriamento verifica-se duas inflexões na curva de resfriamento de todos os termopares quando da entrada em operação dos sistemas de resfriamento acelerado: colocação do resfriador de convecção forçada e do sistema de resfriamento de gás de proteção sob a base, sendo neste último caso mais nítida.

Outro fato notado é a inércia térmica que ocorre nos pontos frios T08 e T09. Isto é revelado pela demora de aproximadamente duas horas para que tais pontos respondam às variações na temperatura de controle no final de encharque. Neste ponto do processo as temperaturas T08 e T09 ainda aumentam, enquanto que a temperatura de controle T13 cai. (T08 no final de encharque igual a 558°C e após 2 horas igual a 582°C).

Outro aspecto a ser realçado é o fato da temperatura T10 não ser a maior no final do encharque e durante o resfriamento ter uma queda de temperatura mais acelerada que a T01. Isto ocorre devido a última bobina da carga ter a possibilidade de troca térmica por radiação pela sua superfície superior.

4 - CORRELAÇÕES MATEMÁTICAS

A partir dos dados estatísticos de temperatura foram desenvolvidas equações estatísticas de regressão, com o objetivo de permitir o cálculo da temperatura em diversos pontos da carga quando do desenvolvimento de novos ciclos de recozimento.

Tal abordagem tornou necessária a sub-divisão do ciclo de recozimento em sete etapas com características térmicas distintas:

- Aquecimento 1 (aquecimento até T14 atingir 550°C);
- Patamar (9 horas com T14 em 550°C);
- Aquecimento 2 (aquecimento até T13 atingir 640°C);
- Encharque (4 horas com T13 em 640°C);
- Resfriamento 1 (resfriamento normal ao ar);
- Resfriamento 2 (resfriamento a partir de 330°C com resfriador por convecção); e
- Resfriamento 3 (resfriamento a partir de 250°C com sistema de resfriamento sob a base).

Foi escolhida como variável independente da correlação estatística o tempo decorrido para cada etapa do processo. A variável dependente escolhida foi a diferença de temperaturas T01-T13 e T08-T13. Deste modo serão obtidas duas curvas ΔT_{xt} que caracterizam as condições extremas de temperatura da carga, ou seja, no ponto quente T01 e no ponto frio T08.

As correlações foram efetuadas com o auxílio de diversos programas estatísticos (1-4). As equações obtidas foram as seguintes:

a - Aquecimento 1

$$\Delta T_{1-13} = -4,981 + 162,979t - 846,810t^2 + 757,772t^3 - 293,145t^4 + 53,010t^5 - 3,670t^6$$

$$R^2 = 0,996 \quad \text{E.P.E.} = 0,581$$

$$\Delta T_{8-13} = -4,650 + 179,770t - 951,718t^2 + 853,502t^3 - 334,205t^4 + 61,284t^5 - 4,298t^6$$

$$R^2 = 0,997 \quad \text{E.P.E.} = 0,679$$

b - Patamar

$$\Delta T_{1-13} = .k65m753 + 75,265 \log(t)$$

$$R^2 = 0,924 \quad \text{E.P.E.} = 14,161$$

$$\Delta T_{8-13} = 1/(-0,00315 - 0,0004t)$$

$$R^2 = 0,991 \quad \text{E.P.E.} = 5,606$$

c - Aquecimento 2

$$\Delta T_{1-13} = -11,399 + 134,739t + 127,274t^2 - 56,917t^3 + 14,106t^4 - 1,464t^5 + 0,062t^6$$

$$R^2 = 0,972 \quad \text{E.P.E.} = 0,453$$

$$\Delta T_{8-13} = -146,984 - 82,172t + 59,107t^2 - 21,905t^3 + 4,531t^4 - 0,477t^5 + 0,020t^6$$

$$R^2 = 0,961 \quad \text{E.P.E.} = 0,374$$

d - Encharque

$$\Delta T_{1-13} = -2,870 + 17,662t - 19,859t^2 + 30,643t^3 - 20,543t^4 + 5,715t^5 - 0,558t^6$$

$$R^2 = 0,994 \quad \text{E.P.E.} = 0,728$$

$$\Delta T_{8-13} = -144,938 + 15,457t$$

$$R^2 = 0,980 \quad \text{E.P.E.} = 2,363$$

e - Resfriamento 1

$$\Delta T_{1-13} = 72,319 \times \exp(-0,067t)$$

$$R^2 = 0,969 \quad \text{E.P.E.} = 2,820$$

$$\Delta T_{8-13} = -66,748 + 66,358t - 10,745t^2 + 0,935t^3 - 0,048t^4 + 0,0013t^5 - 0,000015t^6$$

$$R^2 = 0,997 \quad \text{E.P.E.} = 0,203$$

f - Resfriamento 2

$$\Delta T_{1-13} = T13 - 25,4 \quad \text{D.P.} = 1,61$$

$$\Delta T_{8-13} = T13 - 65,75 \quad \text{D.P.} = 2,71$$

g - Resfriamento 3

$$\Delta T_{1-13} = 106,890 \times \exp(-0,107t)$$

$$R^2 = 0,982 \quad \text{E.P.E.} = 2,984$$

$$\Delta T_{8-13} = 152,482 - 7,318t$$

$$R^2 = 0,980 \quad \text{E.P.E.} = 3,356$$

De uma maneira geral verificou-se que os erros estatísticos nas equações que descrevem o aquecimento são maiores para cálculo de ΔT_{1-13} . Já as equações que descrevem o resfriamento apresentam erros maiores para o cálculo de ΔT_{8-13} . Tal tendência é visível apesar de ser mascarada pela utilização de funções diferentes para as correlações de ΔT_{1-13} e ΔT_{8-13} numa mesma etapa de processo.

É interessante notar que o erro é maior quando a temperatura apresenta maior sensibilidade ao tempo, que é o caso de T01 (ponto quente) no aquecimento e de T08 no resfriamento.

5 - CORRELAÇÕES METALÚRGICAS

Hénin e Brun (5) desenvolveram um parâmetro para descrever a equivalência tempo-temperatura no recozimento em caixa de aços laminados a frio. Tal parâmetro, designado por SPAREQ, é definido como:

$$\text{SPAREQ} = 10000 \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{n \cdot R}{Q} \right) \times (\log(t_e + t_m))$$

onde:

T = temperatura absoluta (K);

n = constante (2,302585);

R = constante dos gases (1,967 cal/mol.grau);

Q = energia de ativação do processo estudado (cal/mol.);

t_e = tempo de elevação até a temperatura T (horas); e

t_m = tempo de manutenção (encharque) na temperatura T (horas).

O parâmetro Q depende se o processo envolvido é recristalização ou crescimento de grão. Os mesmos autores verificaram que as temperaturas de início e fim de recristalização para aço acalmado ao alumínio eram de 568 e 605°C, respectivamente. Logo, caso a temperatura de encharque estiver entre esses dois valores deve-se utilizar a energia de ativação de recristalização (Q_r = 82016 cal/mol.). Caso tal temperatura estiver acima dessa faixa deve ser utilizada a energia de ativação de crescimento de grão (Q_g = 59124 cal/mol.).

A partir destes subsídios foi calculado o valor de SPAREQ para as temperaturas extremas da carga:

T01 T = 666°C, t_e = 10,75h, t_m = 2,50h (horas decimais)
SPAREQ = 9,78

T05=T07 T = 666°C, t_e = 13,00h, t_m = 0,50h
SPAREQ = 9,77

T06 T = 584°C, t_e = 15,00h, t_m = 3,50h
SPAREQ = 10,96

T08 T = 582°C, t_e = 15,00h, t_m = 3,50h
SPAREQ = 10,99

T09 T = 576°C, t_e = 12,75h, t_m = 2,75h
SPAREQ = 11,11

T10 T = 666°C, t_e = 12,30h, t_m = 1,00h
SPAREQ = 9,77

T13 T = 650°C, t_e = 9,75h, t_m = 2,75h
SPAREQ = 9,99

Hénin e Brun obtiveram excelentes correlações lineares do parâmetro SPAREQ com as propriedades mecânicas do material. O parâmetro é inversamente proporcional ao grau de recristalização do material e proporcional à sua resistência mecânica.

Os valores de SPAREQ listados acima permitem verificar que há diferentes graus de recozimento dentro de uma mesma carga. Os pontos quentes sofrem recristalização e crescimento de grão, enquanto que os pontos frios são submetidos apenas a recristalização. A diferença entre os SPAREQ máximo e mínimo é da ordem de 14%. Caso as correlações lineares de Henin e Brun forem válidas para o material da COSIPA deve-se esperar tal dispersão nas propriedades mecânicas do material recozido.

6 - CONCLUSÕES

-- A medição de temperatura em pontos selecionados de uma carga de forno de recozimento de bobinas em caixa permitiu verificar a existência de grupos de temperaturas acima (pontos quentes) e abaixo (pontos frios) da temperatura de controle do forno (T13), durante o aquecimento. Tal situação se inverte no resfriamento.

-- As correlações estatísticas entre as diferenças de temperaturas da carga-controlado do forno e tempo apresentaram bom coeficiente de correlação e baixos erros padrões de estimativa.

-- O parâmetro SPAREQ de equivalência tempo-temperatura sofreu variações da ordem de 14%, indicando flutuações nas propriedades mecânicas do material recozido.

7 - BIBLIOGRAFIA

1. SCHAUM, M.R. "Estatística". Editora Mc-Graw-Hill do Brasil Ltda, São Paulo, 1976, p. 105-145.
2. RATKOWSKY, D.A. "Non-Linear Regression Modeling". Marcel Dekker, New York, 1983, p. 105-133.
3. YAMANE, T. "Estadística". Ed. Harla, México D.F., 1977, 214-250.
4. SHALEV, S.; "GENFIT - A General Least Squares Curve Fitting Program for Mini-Computer". Inf. UEA 57, Abril 1977.
5. HENIN, C. & BRUN, C., "Applications des Relations d'Equivalence Temps-Temperature au Recuit de Recristallization des Aciers Extra-Doux Laminés à Froid", Revue de Metallurgie - CIT, Juillet 1981, 599-606.

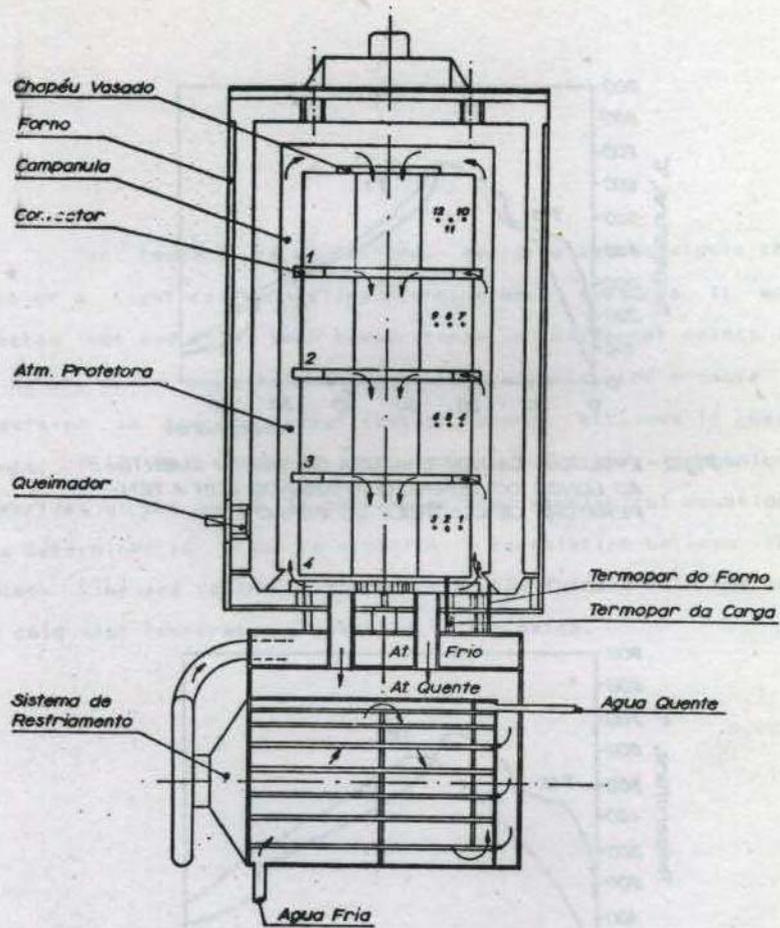


FIG:1 - ESQUEMA DA BASE DE RECOZIMENTO INSTRUMENTADA.

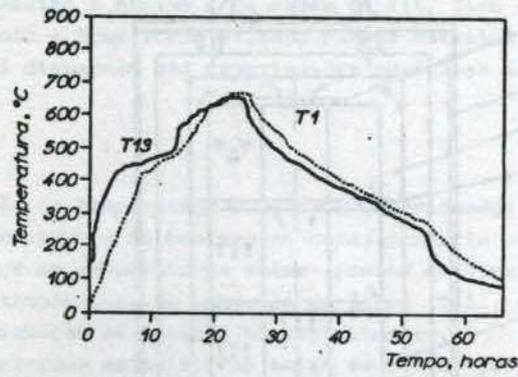


Fig:2 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA 01 (PONTO QUENTE) AO LONGO DO TEMPO, COMPARANDO COM A TEMPERATURA DE CONTROLE DO FORNO (T13).

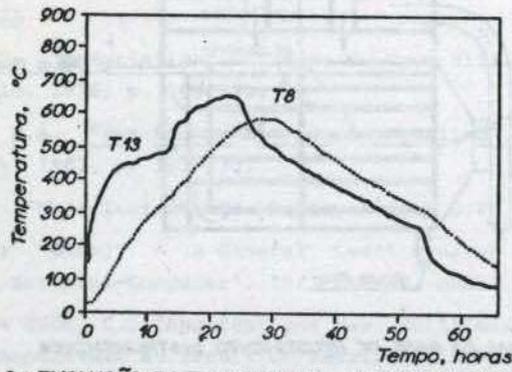


Fig:3 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA 08 (PONTO FRIO) AO LONGO DO TEMPO COMPARANDO COM A TEMPERATURA DE CONTROLE DO FORNO (T13).

ABSTRACT

Dr. Paulo Augusto Franco¹²³
Carlos Sérgio de Souza Lima¹²³
Ivan Oliveira de Azevedo¹²³

The temperature of fourteen selected points within the batch of a tight-coil annealing furnace were measured. It was detected hot and cold spot temperatures in different points in the batch, which originate temperature gradients and promote a dispersion in the recrystallization degree attained in these points. This fact induced to variations in the mechanical properties of the coils. In this paper some statistical equations were determined in order to establish a correlation between the process time and control temperature of the furnace with the hot and cold spot temperatures detected in the batch.

1. INTRODUÇÃO

Os produtos de aço laminado em quente são submetidos a operações de estiramento, que provocam uma redistribuição de temperatura dentro do produto, dando origem a pontos quentes e pontos frios, isto é, locais de maior e de menor temperatura, respectivamente, durante o estiramento, o que ocasiona a formação de pontos quentes e pontos frios.

Os pontos quentes e pontos frios são responsáveis pela dispersão das propriedades mecânicas do produto, o que ocasiona a formação de pontos quentes e pontos frios.