

Seminário

associação brasileira de metais

Automação e Instrumentação

22 a 24 de Novembro de 1989

Belo Horizonte - MG

Supervisão:

Comissão Técnica de Automação
e Instrumentação - COMAUTO

Coordenação:

Julio Henrique
Villas Boas

UTILIZAÇÃO DE FORNO CONTROLADO POR COMPUTADOR EM

PESQUISA SOBRE TRATAMENTOS TÉRMICOS (1)

Autores:

Antonio Augusto Gorni (2)

Oswaldo L. G. Branchini (3)

R E S U M O

É feita a descrição de um forno-mufla controlado por computador e seu esquema de controle. São mostradas ainda duas aplicações deste equipamento: simulação física do processo de recozimento em caixa e análise térmica da transformação da austenita. Verificou-se que a automação deste forno facilita a execução dos ensaios, a aquisição dos dados e seu processamento posterior, tornando os resultados finais mais precisos e confiáveis.

(1) Contribuição Técnica a ser apresentada no II Seminário de Automação e Instrumentação, a realizar-se em novembro de 1989, Belo Horizonte - MG.

(2) Engenheiro de Materiais da Divisão de Pesquisa Tecnológica da COSIPA.

(3) Engenheiro Metalurgista da Divisão de Laminação a Frio da COSIPA.

1 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos processos e produtos na área de conformação e tratamentos térmicos exige a simulação física dos tratamentos efetuados em escala industrial. Essa simulação deve ser efetuada em equipamento capaz de aplicar o mais fielmente possível as condições do processo real para que os resultados obtidos possam ser transferidos à prática industrial de maneira fácil e rápida.

Na área de tratamentos térmicos um processo de simulação metalúrgica relativamente fácil é o recozimento em caixa, desde que se disponha previamente de dados reais da evolução de temperatura a que o material é submetido.

O objetivo deste trabalho é descrever o forno controlado por computador em operação no Departamento de Engenharia Metalúrgica da EPUSP e relatar dois projetos de pesquisa nele efetuados: simulação física do recozimento em caixa e análise térmica da transformação da austenita durante seu resfriamento.

2 - DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO UTILIZADO

O esquema Forno-Controlador-Computador utilizado pode ser visto na fig. 1. O forno, do tipo mufla, é aquecido através de resistências, tem potência máxima de 4800 Watts e temperatura máxima de 1200°C. As dimensões de sua câmara são 150 x 200 x 400 mm.

Dois termopares de Cromel-Alumel, encapsulados em tubo de aço inox com 1,5 mm de diâmetro, podem ser utilizados para monitorar sua temperatura. Normalmente um termopar é utilizado para o forno e outro à amostra. A fim de se evitar interferências no sinal dos termopares, que é da ordem de milivolts, a blindagem dos termopares foi aterrada e seus cabos de compensação mantidos distantes o mais longe possível das linhas de potência do forno. Outra contra-medida possível é o uso de termopares de maior diâmetro, ainda que com alguma perda da velocidade de resposta e flexibilidade de instalação.

Os cabos de compensação são conectados à interface do Controlador. Os dados de milovoltagem são digitalizados em padrão compatível e enviados a um microcomputador IBM-XT, com precisão de 0,01%. A velocidade de máxima de aquisição dos dados é de 1 medida/segundo. O controlador dispõe de relógio interno com resolução de um décimo de segundo, sincronizado com a rede elétrica. Os dados de tempo e temperatura podem

ser repassados a um programa em linguagem BASIC residente na memória do microcomputador através da instrução INP.

Um polinômio de dupla precisão, determinado por regressão estatística polinomial (1) a partir dos dados característicos do termopar de Cromel-Alumel (2), permite o cálculo das temperaturas reais, levando em conta que a própria interface efetua eletronicamente o ajuste da junta fria. Este polinômio tem a seguinte forma:

$$T = a V^5 + b V^4 + c V^3 + d V^2 + e V + f \quad (1)$$

onde:

- T = Temperatura, °C,
- V = Sinal do Termopar, milivolts;
- a = - 9.7365786323 x 10⁻⁷;
- b = + 0.000140171313257;
- c = - 0.0055764603011;
- d = + 0.055145966311;
- e = + 24.4061277785;
- f = + 0.16361011826.

A potência a ser enviada ao forno também é controlada pelo computador, através do programa em linguagem BASIC. Desse modo, pode-se calcular a potência a ser fornecida a partir da temperatura do forno e/ou amostra. O controle de potência pode ser efetuado de 0 a 100%, com resolução de 1/256 e com corrente máxima de saída de 30 A.

O algoritmo para controle de temperatura utilizado atualmente calcula a potência do forno a partir da soma de três parcelas denominadas Proporcional, Diferencial e Integrador. O Proporcional atua de forma preponderante quando o forno se encontra a uma temperatura muito menor que a objetivada. À medida que o forno se aquece, ao se atingir uma dada temperatura mais próxima da objetivada sua contribuição à potência calculada passa a diminuir. O Integrador corrige essa falha, suplementando a potência do forno de modo a se atingir, de forma precisa, a temperatura desejada. Uma vez atingida a temperatura objetivada é necessária a atuação do Diferencial, para que a temperatura seja mantida sem muitas flutuações no patamar estabelecido. As três parcelas acima são corrigidas por fatores empíricos que dependem do forno utilizado, sua taxa de aquecimento, perdas térmicas, massa de material enfiado e faixa de temperaturas utilizada.

A figura 2 mostra o fluxograma do programa que controla a evolução térmica do forno e a aquisição e registro dos dados de tempo, temperatura e potência.

3 - EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO

3.1 - Simulação Metalúrgica do Recozimento de Bobinas em Caixa

O recozimento de bobinas de aço é efetuado empilhando-se de duas a seis bobinas em uma base fixa, como mostra a figura 3. Este processo é caracterizado por um aquecimento lento e com velocidades diferentes nos diversos pontos de uma mesma bobina, bem como de uma bobina a outra. Isto cria uma dispersão nas propriedades mecânico-metalúrgicas do material, pois cada região da carga terá uma história térmica diferente.

Um ciclo padrão de recozimento consiste em:

- Aquecimento desde a temperatura ambiente até 670°C em 36 horas;
- Encharque a essa temperatura durante 10 horas;
- Resfriamento durante 45 horas até 90°C.

Conforme mostrado quantitativamente em (3), a evolução de temperatura em certos pontos da carga pode ser muito diferente. Logo, seria interessante determinar os efeitos de tais diferenças na microestrutura do material. Uma vez que o estudo "in loco" das bobinas recozidas industrialmente seria muito trabalhoso, caro e provocaria distúrbios na produção e grande desvio de material, considerou-se muito mais conveniente simular tais ciclos térmicos em pequenas amostras de aço num forno em escala de laboratório. Tal simulação é muito mais barata que um experimento industrial e a manipulação das amostras é muito simples.

Para este estudo 28 amostras de aço microligado de dimensões 1,50 x 20 x 45 mm foram colocadas numa caixa metálica cheia de granalha de aço. Um termopar foi inserido na caixa para se monitorar as temperaturas das amostras, enquanto que um segundo termopar ficou suspenso na câmara do forno. O conjunto foi colocado dentro do forno à temperatura ambiente, protegido com nitrogênio e submetido ao seguinte ciclo programado de aquecimento, que representa fielmente as condições industriais do processo de recozimento de bobinas:

- a) 25 a 250°C a 5,00°C/min;
- b) 250 a 330°C a 1,80°C/min;
- c) 330 a 420°C a 0,75°C/min;
- d) 420 a 480°C a 2,00°C/min;
- e) 480 a 520°C a 0,90°C/min;
- f) 520 a 550°C a 0,30°C/min;

- g) 550 a 600°C a 0,13°C/min;
- h) 600 a 670°C a 0,11°C/min;
- i) encharque a 670°C durante 10 horas.

Foram retiradas amostras ao longo do tratamento para análise metalográfica quantitativa, microdureza e análise de precipitados.

A figura 4 mostra a evolução de temperatura programada e real relativa à amostra, bem como a diferença entre elas, a partir dos dados adquiridos pelo computador ao longo do ensaio. A tabela I mostra os resultados da análise estatística efetuada sobre os desvios observados entre a evolução de temperatura programada e real, destacando-se que o erro padrão da temperatura foi de +/- 1,63°C, que é um valor irrelevante para o processo metalúrgico em questão.

A partir desta análise pode-se constatar o bom grau de ajuste entre a programação de temperatura e a evolução efetivamente obtida, o que garante a precisão da simulação realizada.

3.2 - Análise Térmica da Transformação da Austenita

A determinação das temperaturas em que ocorre as diversas reações de decomposição da austenita é importante para o correto dimensionamento dos tratamentos térmicos ou termomecânicos a que o material é submetido, para que o produto adquira as propriedades objetivadas. A análise térmica da transformação da austenita permite a detecção dessas temperaturas em aços previamente deformados a quente, onde a aplicação dos métodos tradicionais de dilatométrica é difícil.

No presente experimento chapas de dimensões 100 x 50 x 5 mm de aço inoxidável, ao C-Mn, microligado ao Nb e bifásico foram austenitizadas e solubilizadas no forno controlado por computador durante 40 minutos. A seguir elas foram resfriadas ao ar calmo até a temperatura ambiente.

O aquecimento das amostras e a aquisição/armazenamento dos dados de tempo e temperatura foram controlados por um programa em linguagem BASIC, inclusive durante a fase de resfriamento.

Após os ensaios calculou-se a evolução da taxa de resfriamento ao longo do tempo a partir dos dados armazenados.

Inicialmente os dados de temperatura em relação ao tempo foram amortizados através de um método numérico baseado na Transformada Rápida de Fourier (4), que simulou o filtro passa-baixo utilizado na eli

minação de altas frequências. Este método consiste basicamente em de-
terminar, a partir do conjunto de dados fornecidos, seu espectro ponde-
rado de frequências. Partindo-se do princípio que a porção do espec-
tro relativa às altas frequências consiste apenas de ruído espúrio e
que a informação útil se concentra na faixa de baixas frequências, a-
plica-se a seguir uma função filtro digital a esse espectro, eliminan-
do-se progressivamente as altas frequências presentes. O espectro as-
sim modificado é submetido então à Transformada Inversa de Fourier,
obtendo-se desse modo o conjunto de dados amortizados. Como se vê, a
principal vantagem deste método é a identificação e eliminação automá-
tica do ruído de alta frequência.

O grau de amortização empregado pode ser variado. Sua determina-
ção é empírica. O ideal é que o ensaio seja repetido, a fim de que e-
ventuais picos aleatórios sejam detectados, uma vez que normalmente
eles não devem ocorrer de forma significativa no mesmo local mais de
uma vez. Este procedimento é eficiente para se evitar o ruído de bai-
xa frequência que eventualmente esteja presente. De forma geral, o
tratamento dos dados é mais fácil se for utilizada uma prática experi-
mental consistente e alta velocidade de aquisição de dados.

A partir dos dados de temperatura amortizados calculou-se então a
taxa de resfriamento através de um algoritmo de diferenciação geomé-
trica (1). Gerou-se então o gráfico Temperatura x Taxa de Resfriamen-
to, sendo possível então detectar as diversas reações da austenita de-
vidas às perturbações peculiares da curva.

Um exemplo da curva assim gerada pode ser visto na figura 5. Maior
detalhes metalúrgicos sobre a determinação dessas curvas podem
ser encontrados em (5).

A automação da execução do ensaio, aquisição dos dados, seu pro-
cessamento e geração de gráficos permite rapidez e consistência ao en-
saio, aumentando a confiabilidade nos resultados obtidos.

4 - CONCLUSÕES

A utilização de equipamentos controlados por computador permite a
automação da simulação de processos metalúrgicos, facilitando sua exe-
cução e tornando os dados obtidos mais precisos e confiáveis.

Descreveu-se aqui as características e operação de um forno con-
trolado por computador, que permite a aquisição automática de dados
de temperatura e tempo, bem como o controle da potência fornecida ao
forno.

Também foram mostrados dois exemplos de como esse equipamento po-
de ser utilizado em projetos de tratamento térmico: simulação metalú-
rgica do recozimento em caixa e análise térmica da transformação da
austenita. Verificou-se que a execução dos ensaios foi muito facilita-
da, como também a aquisição dos dados e seu tratamento posterior, o
que aumentou a precisão e confiabilidade dos resultados.

5 - BIBLIOGRAFIA

1. KOPCHENOVA, N.V. e outros. Computational Mathematics. Mir Pu-
blishers, Moscow, 1984, 392 p.
2. ANON. Thermocouple Reference Tables. Eurotherm Corporation,
Reston, 1981, 120 p.
3. BRANCHINI, O.L.G. & GORNI, A.A. Correlação Matemática entre as
Temperaturas de uma Carga em Fornos de Recozimento de Bobi-
nas. In: 43. Congresso Anual da ABM. Associação Brasileira
de Metais, Belo Horizonte, 1988, p. 411-423.
4. SOKOLNIKOFF, I.S. e outros. Mathematics of Physics and Modern
Engineering. Mc Graw-Hill-Kogakusha, Tokyo, 1966, 745 p.
5. GORNI, A.A. & BRANCHINI, O.L.G. Determinação das Temperaturas
de Transformação da Austenita através de Análise Térmica.
In: X Seminário de Metalurgia Física e Tratamentos Térmicos.
Associação Brasileira de Metais, Rio de Janeiro, 1989.

6 - TABELAS

Valor Máximo	:	22,00°C
Valor Mínimo	:	-11,00°C
Média dos Desvios	:	1,70°C
Desvio Padrão	:	8,48°C
Erro Padrão da Média:	:	1,63°C

Tabela I - Resultados da análise estatística dos desvios entre
o ciclo programado e o real.

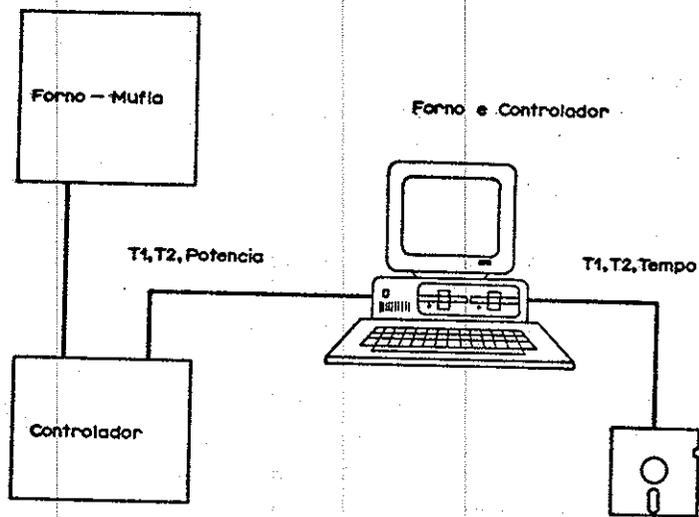


FIG.:1 - ESQUEMA DO SISTEMA FORNO-CONTROLADOR-COMPUTADOR UTILIZADO.

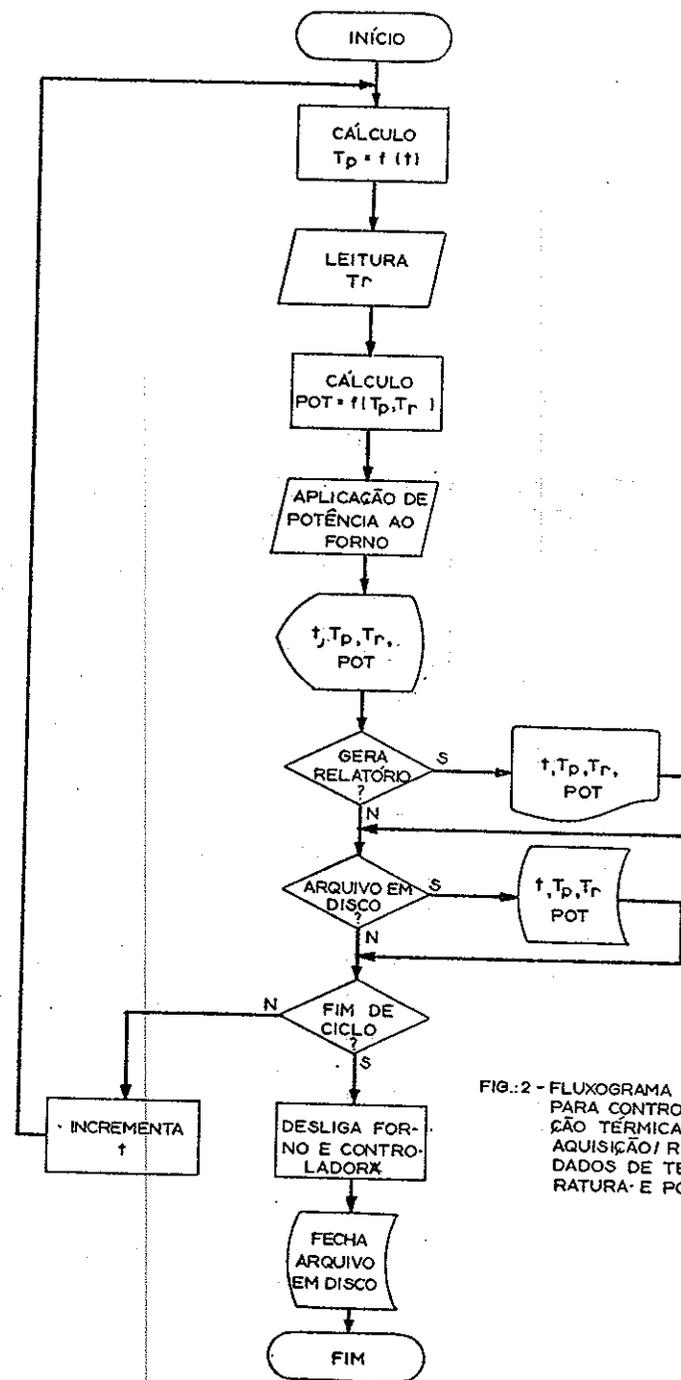


FIG.:2 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA PARA CONTROLE DA EVOLUÇÃO TÉRMICA DO FORNO E AQUISIÇÃO/REGISTRO DOS DADOS DE TEMPO, TEMPERATURA E POTÊNCIA.

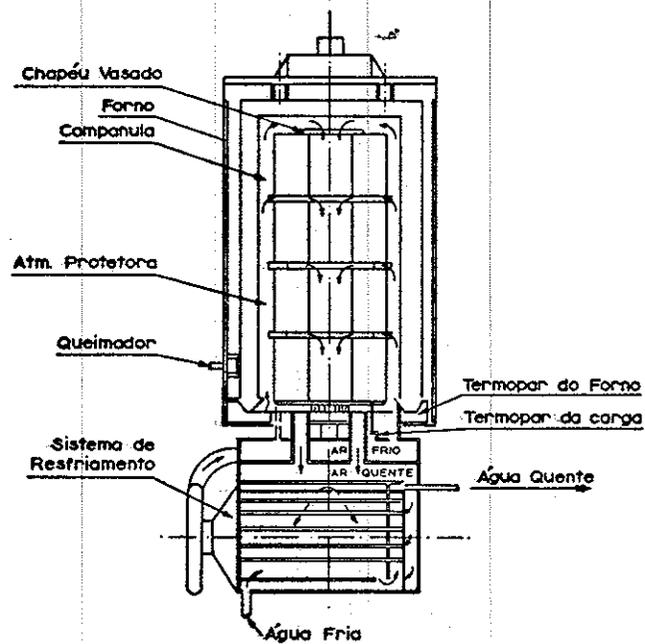


FIG. 3 - ESQUEMA DE UMA BASE DE RECOZIMENTO.

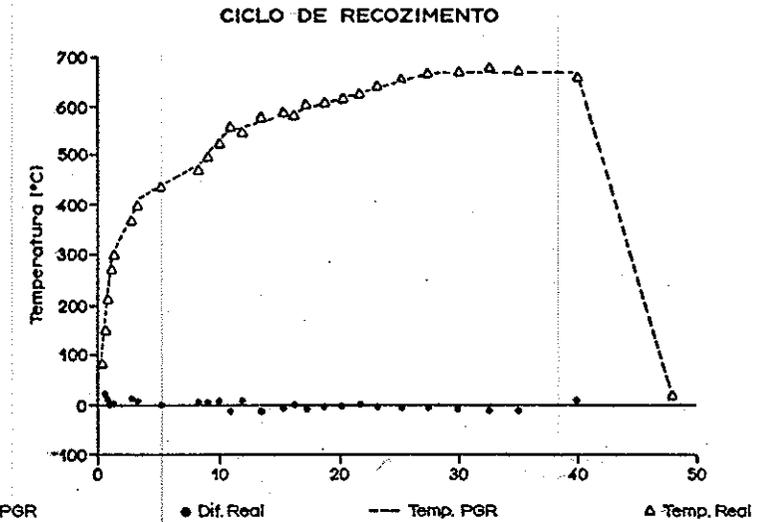


FIG. 4 - EVOLUÇÃO PROGRAMADA E REAL DA TEMPERATURA NO CICLO DE RECOZIMENTO SIMULADO EM LABORATÓRIO.

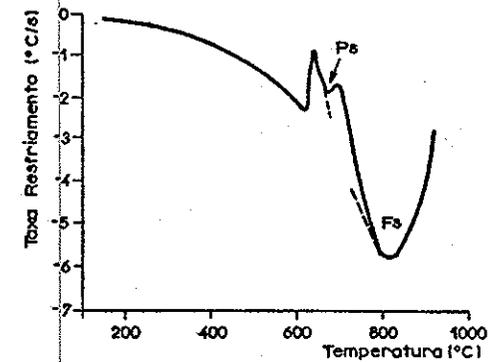


FIG. 5 - EVOLUÇÃO DA VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO AO LONGO DA TEMPERATURA PARA O AÇO AO C-Mn, RESFRIAMENTO AO AR CALMO.