



## SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE AJUSTE DOS ALGORITMOS DE CONTROLE DE PROCESSO

**Venceslau Xavier de Lima Filho**

**Raimundo Carlos Martins Leite**

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará – UFC

Bloco 714 – Campus Universitário do Pici – 60455-760 Fortaleza – Ceará

E-mail: rcarlos@dem.ufc.br

**Resumo.** Levando em consideração o projeto e os índices operacionais de uma máquina de lingotamento contínuo de placas de aço, foi desenvolvido um software de simulação digital, que permite o ajuste dos parâmetros utilizados nos algoritmos de controle de processo. O modelamento matemático de transferência de calor foi desenvolvido, considerando uma equação de condução transiente unidirecional e as equações de condições de contorno, que foram desenvolvidas através de um modelo numérico de diferença finita do fluxo de calor, considerando as propriedades termofísicas variáveis de acordo com a solidificação e transformações de fases no estado sólido do material ao longo do equipamento. Foram consideradas as três zonas do molde, “spray” e resfriamento ao ar, da máquina de lingotamento contínuo, no desenvolvimento do programa de computador de cálculo do perfil térmico em função do tempo de resfriamento. A análise dos resultados obtidos nas regiões dos “sprays” e do resfriamento ao ar permitiu a introdução de ações corretivas no projeto e nos parâmetros operacionais do equipamento. Neste trabalho foi utilizada uma configuração de hardware baseada em microcomputadores do tipo PC, com auxílio de sistema operacional multiusuário, multitarefa e multiprocessamento em ambiente X-windows, que garantiu a segurança do data link entre os mesmos.

**Palavras-chave:** Lingotamento contínuo, Transferência de calor, Solidificação do aço, Simulação, Controle.

### 1. INTRODUÇÃO

O controle do sistema secundário de resfriamento dos “sprays” em tempo real apresenta dois problemas que dificultam seu emprego em escala industrial: manutenção de uma temperatura constante na superfície da placa, com relação ao tempo e garantia da inexistência de trincas no produto final. O primeiro representa um desafio, apesar das variações de velocidade de lingotamento permitidas pelo equipamento, enquanto o segundo, requer um controle rigoroso na fase final deste sistema de resfriamento. Este controle pode ser obtido pelo ajuste dos algoritmos de controle de processo em tempo real em microcomputadores interligados em

rede, permitindo a utilização de uma estação dedicada à execução de tarefas de simulação digital do processo.

Depois de passada a euforia acadêmica com o advento da “Web”, a possibilidade de reconfiguração dinâmica de servidores e estações de trabalho em ambiente de rede, tornou possível a existência de sistemas operando em tempo real e de modo “full-time”, utilizando sistema operacional multiusuário, multitarefa e multiprocessamento, com sistemas de arquivos que garantem uma consistência adequada dos mesmos. A coexistência de estações que executam tarefas de aquisição de dados e de controle, com estações que executam processos de simulação digital, tem sido a forma mais adequada no projeto de novos sistemas de controle de processo. (Neittaanmaki, et al, 1990) otimizaram o valor da vazão da água de refrigeração dos sprays através de um sistema de controle e simulação digital implementado em microcomputadores.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

Uma máquina de lingotamento contínuo, apresenta três zonas em que ocorrem diferentes taxas de resfriamento. A primeira delas dentro do molde, onde inicialmente o metal fundido está em contato com a superfície do molde. A transferência de calor através da água de resfriamento do molde causa a solidificação do metal líquido e com o resfriamento adicional da fina casca de metal solidificado produzido por esse resfriamento desloca para fora da parede do molde deixando uma brecha de ar ou fosso. Quando o material sai do molde, existe uma fina casca metálica envolvendo o material líquido, que é submetida ao resfriamento secundário causado pela aplicação dos sprays de água na superfície do metal. Na zona de spray a taxa de transferência de calor é controlada pela diferença de temperatura entre a superfície metálica e a água de resfriamento, onde o resfriamento é essencialmente condutivo. O resfriamento abaixo da região de spray ocorre ao ar, apresentando uma característica essencialmente radiativa e com taxa de transferência de calor sendo uma função das temperaturas da superfície e do ar elevadas à quarta potência.

No lingotamento de placas é considerada a espessura da placa sendo muito menor que a largura ou o comprimento, e a transferência de calor pode ser considerada como unidirecional, na direção transversal à face de maior dimensão da placa. O modelo unidirecional pode ser então usado. Com o advento do computador é mais conveniente se usar o modelo numérico de diferenças finitas do que derivar uma solução analítica para a transferência de calor.

Essencialmente a metade da espessura da placa é dividida em um número de elementos com espessura  $\Delta x$  e cada elemento é caracterizado por apresentar a mesma temperatura, assumindo que essa temperatura é constante por todo o elemento. Claramente isto não representa verdadeiramente o gradiente de temperatura real na placa, mas uma aproximação semelhante aproxima o verdadeiro gradiente com apenas poucos elementos. O avanço da fatia da placa através da máquina de lingotamento contínuo ocorre à uma velocidade  $U$  na direção  $z$  na direção longitudinal e a equação que descreve a transferência de calor é:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot c \cdot U \cdot \frac{\partial T}{\partial z} - \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] = 0 \quad (1)$$

onde  $\rho$  é a densidade,  $c$  é o calor específico e  $k$  é a constante de condutividade térmica do metal. O calor latente de solidificação pode ser incluído mudando o calor específico por toda a extensão da solidificação, e transferência de calor convectivo no líquido pode ser obtida ajustando a condutividade térmica do aço líquido.

Através dessas considerações a Eq. (1) se reduz a:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - b \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 = 0 \quad (2)$$

onde  $b$  é a taxa de variação da condutividade térmica com a temperatura.

Por substituição de primeira ordem, avançando e aproximando a diferença central na Eq. (2) e resolvendo para  $T_j'$  a temperatura no elemento  $j$ -ésimo ao final do intervalo de tempo  $\Delta t$ .

$$T_j' = T_j + \frac{\Delta t}{\Delta x^2 \cdot \rho \cdot c} \cdot \left[ k \cdot (T_{j+i} + T_{j-i} - 2 \cdot T_j) + \frac{b}{4} \cdot (T_{j+i}^2 - 2 \cdot T_{j+i} \cdot T_{j-i} + T_{j-i}^2) \right] \quad (3)$$

$T_j$  é temperatura para o mesmo elemento no início do intervalo  $\Delta t$ .

A Equação (3) calcula a temperatura para todos os elementos, exceto aqueles do centro da placa e da superfície.

No centro é assumido que não ocorre transferência de calor na linha do centro:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

e uma substituição de segunda ordem e aproximando a diferença posterior da derivada da distancia e resolvendo para  $T'_1$ :

$$T'_1 = \frac{4}{3} \cdot T'_2 - \frac{1}{3} \cdot T'_3 \quad (5)$$

onde  $T'_2$  e  $T'_3$  são obtidos no fim do incremento de tempo  $\Delta t$ . A remoção do calor da superfície da placa é uma função do tempo, segundo a Eq. (6).

$$q_{out} = f(t) \quad (6)$$

e a taxa de transferência de calor em cada zona da máquina de lingotamento contínuo tem sido obtida empiricamente:

$$q_{out} - k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\Delta x}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

A substituição de primeira ordem posterior e a diferença aproximada anterior para a derivada do tempo e a distancia resolvida para  $T'_n$ :

$$T'_n = T_n + \frac{2 \cdot \Delta t}{\Delta x^2 \cdot \rho \cdot c} \cdot [k \cdot (T_{n-1} - T_n) - \Delta x \cdot q_{out}] \quad (8)$$

Os valores empíricos para  $q_{out}$  são dados abaixo (Mizikar, 1967):

$$q_{molde} = 850000 - 100000\sqrt{t} \quad (9)$$

$$q_{spray} = h_s \cdot (T_n - T_{H_2O}) \quad (10)$$

$$q_{rad.} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_n^4 - T_{ar}^4) \quad (11)$$

Dessas equações é relativamente simples codificar um programa de computador para calcular as temperaturas através da placa em função do tempo de resfriamento. O incremento de tempo  $\Delta t$  é escolhido para ser pequeno o suficiente para obter soluções não apreciavelmente afetada pelo incremento da dimensão. O maior problema ocorre na fixação do incremento  $\Delta t$ , quando o material entra e sai da região de interface sólido-líquido, requerendo um ajuste do calor específico do material no intervalo de tempo considerado.

### 3. APLICAÇÃO DO MODELO NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE PLACAS

No processo de lingotamento contínuo de placas, as seguintes variáveis foram consideradas:

- 1) Temperatura de vazamento do aço.
- 2) Composição química do aço.
- 3) Largura da placa.
- 4) Características do resfriamento do molde.
- 5) Características do resfriamento secundário: intensidade e tempo de permanência na zona de resfriamento dos sprays, e tempo de permanência no resfriamento por radiação.

Na Tabela 1 mostramos os dados enviados pela estação cliente de controle e aquisição de dados à estação servidor que executa as tarefas de simulação e de displays gráficos.

Tabela 1. Dados de entrada do modelo

Descrição dos itens	Valor
Espessura da placa	0,150 m
Temperatura de vazamento do aço	1555 °C
Teor em carbono do aço	0,20 %
Coefficiente de transferência de calor no spray	425 W.m <sup>2</sup> .°C <sup>-1</sup>
Tempo de permanência no molde	24 s
Tempo de permanência nos sprays	476 s
Temperatura da água dos sprays	25 °C

#### 3.1. Perfil de solidificação no molde

O processo de transferência de calor na região do molde ou "coquilha" é caracterizado por três sub-regiões: interfaces molde-metal líquido, película sólida do aço-molde e fosso

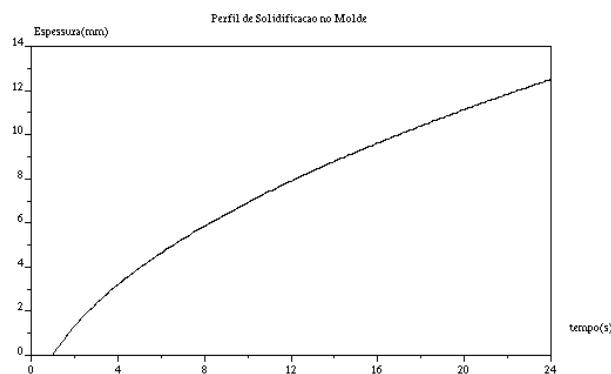


Figura 1. Perfil de solidificação no molde

existente entre película sólida do aço e molde. Considerando os dados experimentais de (Mizikar, 1967), a taxa de transferência de calor foi medida em função do tempo, cujos resultados foram considerados neste trabalho. Na Fig.1 indicamos o perfil de solidificação obtido neste trabalho, correspondente ao formato parabólico expresso pela Eq. (12).

$$d = 3,21 \cdot \sqrt{t} - 3,22 \quad (12)$$

Na Equação (12), temos d (espessura) em mm e t (tempo) em s.

### 3.2. Transferência de calor no resfriamento secundário

O algoritmo de controle executado pela estação cliente, responsável pelo controle da máquina de lingotamento contínuo, objetiva a produção de uma placa de aço isenta de trincas superficiais ou subsuperficiais, levando em consideração o perfil de temperatura da superfície da placa, calculado pela estação tipo servidor de simulação. Este perfil de temperatura, assim como, a curva de temperatura do centro da placa e a configuração do menisco do aço líquido contendo cristais das fases sólidas, são mostrados na Fig. 2.

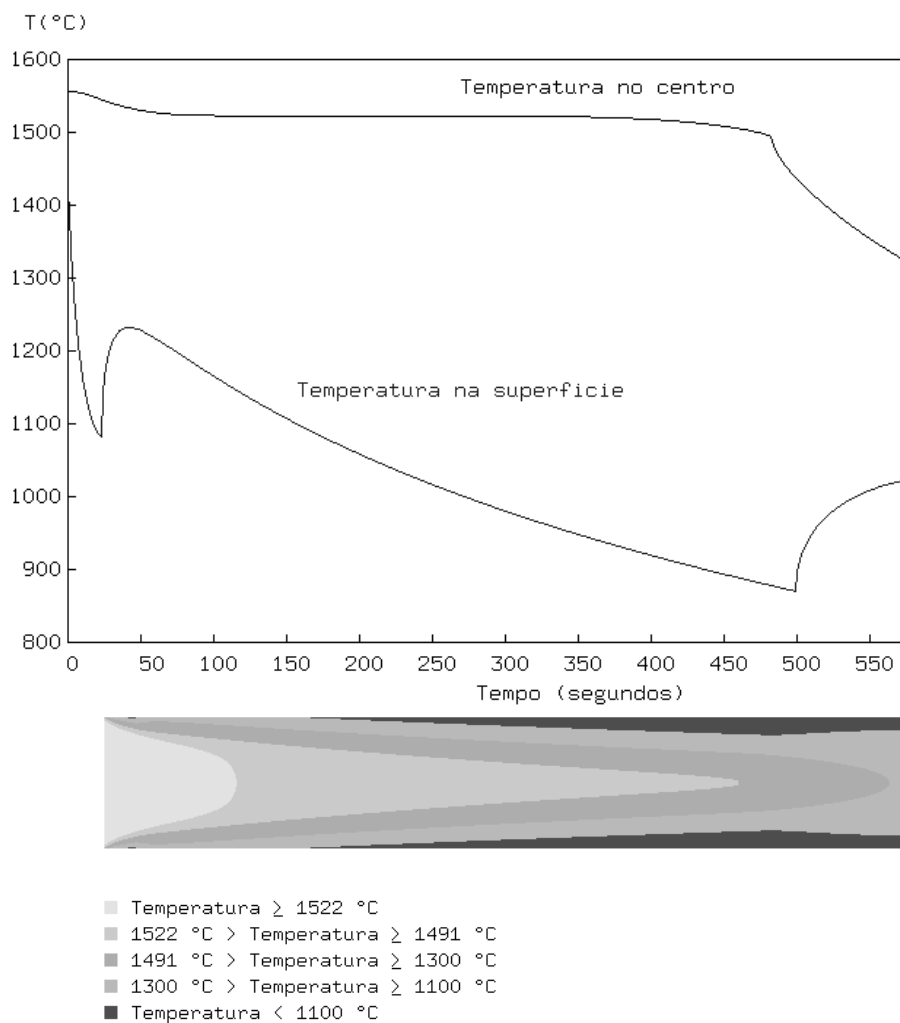


Figura 2 - Perfis de temperatura e configuração do menisco

Considerando os parâmetros operacionais da Tabela 1, foram calculados os valores das temperaturas solidus igual a 1491°C e liquidus igual a 1522 °C, de acordo com os dados termoquímicos de (Turkdogan, E. T., 1996).

#### 4. CONFIGURAÇÃO DE SOFTWARE DO SISTEMA

Na Figura 3 mostramos a configuração de software das estações que executam os processos de controle e aquisição de dados, e as tarefas de simulação e indicação gráfica. Os procedimentos de montagem de “filesystems” do tipo NFS são executados tanto pela estação do tipo servidor, como pela estação do tipo cliente, durante a fase de partida do sistema, que opera no modo multiusuário, multiprocessamento e multitarefa, em ambiente gráfico X-windows, cuja tela gráfica é mostrada na Fig. 2. Vale ressaltar a segurança dos sistemas envolvidos, assim como, a consistência do sistema de arquivos, garantidos pelo sistema operacional utilizado.

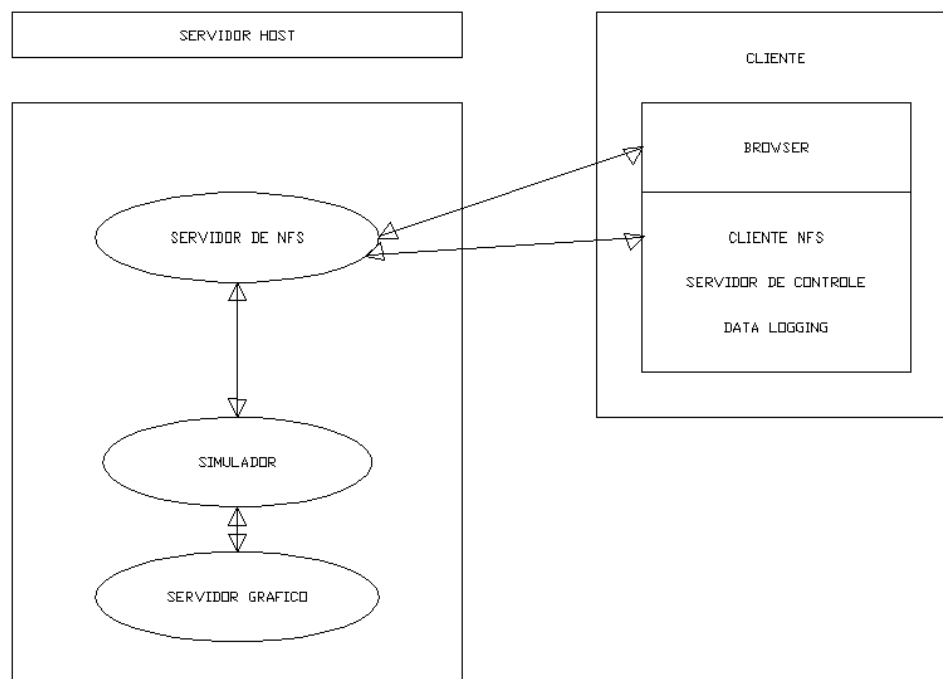


Figura 3. Configuração de software do sistema.

#### 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A variação de espessura calculada da camada solidificada de aço no interior do molde, com o tempo, mostrou uma concordância com os dados experimentais de (Mizikar, 1967), mostrando um desvio menor do que 5% em relação ao medido. A taxa de resfriamento calculada na região correspondente ao final da zona secundária dos sprays, indicou um valor igual a 0,46°C/s, o que garante uma operação segura e isenta de trincas superficiais, levando em consideração a temperatura de formação da ferrita a partir da austenita, que é calculada pela estação tipo servidor e monitorada pela estação tipo cliente, responsável pelo controle do equipamento.

## 6. CONCLUSÃO

A configuração do sistema apresentado mostrou-se eficaz, considerando a segurança do data link utilizado entre as estações dos tipos cliente e servidor.

O ajuste dos parâmetros do algoritmo de controle é garantido pelo monitoramento do perfil calculado de temperatura superficial na zona de resfriamento secundário, que apresentou uma taxa de resfriamento igual a  $0,46^{\circ}\text{C/s}$  e uma diferença menor do que 5% em relação ao valor medido.

## REFERÊNCIAS

- Mizikar, E. A. , 1967, Mathematical heat transfer model for solidification of continuously cast steel slabs, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, vol. 239, 11, pp.1747-1753.
- Neittaanmaki, P., Mannikko, T. and Laitinen, E., 1990, Real-time simulation and control system for the continuous casting process, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer Verlag, vol. 143, pp. 809-817
- Turkdogan, E. T., 1996, Fundamentals of Steelmaking, The Institute of Materials

## COMPUTACIONAL SIMULATION AS A TOOL FOR PROCESS CONTROL ALGORITHM TUNING

**Abstract.** *In order to improve the process control system of a continuous casting strand, a numerical simulation has been developed. The mathematical model of heat transfer was used to predict temperature distribution and solid shell formation. Transient heat transfer in the early stages of solidification of a low carbon steel on a water-cooled chill and the consequent evolution of the temperature profile has been taking into account. Measurements of heat flux in the mould and measurements of strand surface temperatures in the secondary cooling region has been done. The system has been implemented on microcomputer network system, with a server-client basis. By considering a multiuser, multitasking and multiprocessing operating system with a wide array of filesystems and partition types for interconnectivity, a continuously and safe running system has been assured.*

**Keywords:** *Continuous casting, Heat transfer, Steel solidification, Simulation, Control.*