

# O papel do modelamento matemático na automação da laminação de chapas grossas

Antonio Augusto Gorni  
Jackson Soares de Souza Reis  
Marcos Antonio Stuart  
Vicenzo Bruno Formica  
Nilton Tuneshi Sugahara  
José Herbert Dolabela da Silveira

*Avaliou-se uma sistemática para determinação do comportamento do processo de laminação de chapas grossas da Companhia Siderúrgica Paulista (Cosipa) baseado no cálculo do esquema de passe. As equações que melhor se adaptaram à metodologia foram: Sims, para o modelamento da carga de laminação; e Misaka, para o modelamento da resistência à deformação a quente do laminado. Como resultado das formulações é mostrado um fluxograma básico para testes do modelo matemático para posicionamento do parafuso do laminador.*

CONTRIBUIÇÃO  
TÉCNICA Nº 2373

Especial para a Revista Metalurgia & Materiais

## INTRODUÇÃO

A competição siderúrgica mundial tem-se acirrado nos últimos anos como consequência de acontecimentos excepcionais. Dentre eles, pode-se citar a evolução da tecnologia siderúrgica do Japão, a recuperação americana neste setor, a unificação européia e o colapso da antiga União Soviética. Enquanto que nos três primeiros casos observa-se um empenho cada vez maior em se produzir aço melhor e mais barato, no último o que ocorre é um esforço para se trocar esses material, muitas vezes subsidiado, por alimentos.

A partir daí não é surpreendente constatar que o mercado siderúrgico mundial é difícil há algumas décadas. Nada indica que a situação melhorará: novos materiais alternativos, como cerâmicas e polímeros de alto desempenho, progressivamente estão substituindo o aço, tornando esse mercado ainda mais restrito.

Logo, para que uma siderúrgica continue competitiva, é vital que oferte produtos com excelentes níveis de qualidade e aceitação a preços compatíveis internacionalmente - vale dizer, cada vez menores.

A automação do processo de laminação de chapas grossas insere-se nesse contexto, já que é um dos principais itens de evolução que promovem a melhoria e o aprimoramento tanto do processo de fabricação como do desempenho do produto. Ele também possibilita a administração da

produção, o controle do processo, o planejamento e programação da produção e, finalmente, a estabilidade da qualidade do produto.

A necessidade de investimentos na automação da laminação é justificada mesmo em épocas de crise econômica, uma vez que se consegue aumentar a produtividade e o rendimento, melhorar o desempenho operacional e diminuir os custos de fabricação, trazendo significativo ganho na relação custo/benefício na produção de chapas grossas. Tais aperfeiçoamentos podem vir a ser decisivos para garantir a competitividade de uma usina.

A laminação de chapas grossas é um processo que requer operação uniforme, confiável, previsível, consistente e independente de alterações pessoais para que apresente uma evolução positiva sistemática em seu desempenho. Tal objetivo é alcançado quando se tem um sistema produtivo automatizado de bom desempenho, baseado na utilização de modelos matemáticos relacionados aos fenômenos que ocorrem durante a laminação. São eles:

- a) Reaquecimento de placas;
- b) Esquema de passes de deformação;
- c) Resfriamento do esboço ao longo da laminação;
- d) Controle da planicidade do produto;
- e) Desempenho a quente do laminado;
- f) Evolução microestrutural do material.

Antonio Augusto Gorni, Membro da ABM, engenheiro de Materiais, Mestre em Engenharia Metalúrgica, Divisão de Pesquisa e Tecnologia da Companhia Siderúrgica Paulista (Cosipa). Professor-Assistente do Departamento de Metalurgia da Faculdade de Engenharia Industrial (FEI).

Jackson Soares de Souza Reis, Membro da ABM, engenheiro Metalurgista, Seção de Engenharia de Processo de Laminação da Companhia Siderúrgica Paulista (Cosipa). Professor do Curso Técnico de Siderurgia da Escola SENAI em Santos (SP).

Marcos Antonio Stuart, Membro da ABM, engenheiro Metalurgista, Seção de Engenharia de Processo de Laminação da Companhia Siderúrgica Paulista (Cosipa).

Nilton Tuneshi Sugahara, Membro da ABM, engenheiro Mecânico, Seção de Engenharia de Processo de Laminação da Companhia Siderúrgica Paulista (Cosipa).

José Herbert Dolabela da Silveira, Membro da ABM, engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia Metalúrgica, Seção de Engenharia de Processo de Laminação da Companhia Siderúrgica Paulista (Cosipa).

O sistema de automação deve ser auto-corretivo e auto-adaptativo, quando operando no modo "on-line". É interessante que também possa ser utilizado "off-line", com o controle da operação sendo realizado manualmente, ou seja, condicionado à aprovação dos operadores. Também é de enorme utilidade que os modelos matemáticos possam ser utilizados em simulações de condições operacionais novas antes que as mesmas venham a ser implementadas industrialmente.

O processo de laminação de chapas grossas tem como requisito básico produzir laminados dentro das dimensões e tolerâncias requeridas pelos clientes, com propriedades mecânicas adequadas à aplicação específica do material, sem comprometer os limites operacionais da linha de produção.

A complexidade da interação entre as variáveis de processo, as dimensões e formato dos laminados, suas propriedades mecânicas e os limites operacionais do processo, faz com que a combinação ótima entre estes fatores só seja de fato conseguida quando os fenômenos metalúrgicos e mecânicos envolvidos são conhecidos e previsíveis através de modelos matemáticos, os quais podem ser utilizados nos sistemas de automação.

As propriedades mecânicas dos produtos são determinadas pela evolução microestrutural, que por sua vez é função dos parâmetros do processo de laminação: temperatura, grau e velocidade de deformação. Estes parâmetros, bem como as dimensões e a forma dos esboços laminados, dependem das variáveis de processo: carga de laminação, esquema de passes, composição química do aço e características operacionais dos equipamentos.

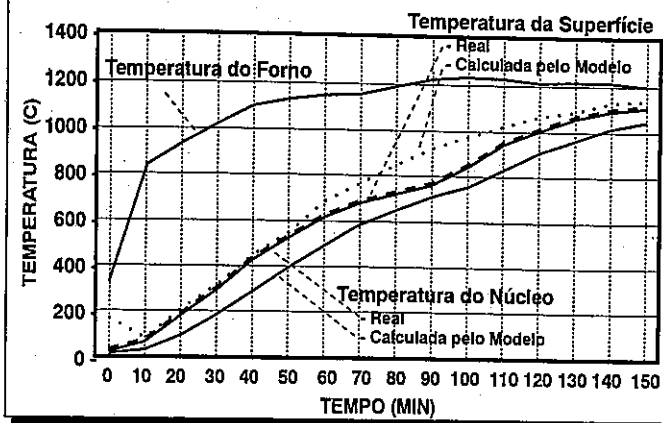
Os modelos matemáticos podem ser subdivididos em modelos de processo e modelo metalúrgicos. Os modelos de processo correlacionam as condições operacionais com os parâmetros de controle em cada equipamento da linha de produção. Já os modelos metalúrgicos correlacionam estes parâmetros com a evolução microestrutural e as propriedades mecânicas obtidas nos produtos de chapas grossas.

O desenvolvimento dos modelos matemáticos necessários à implantação de um sistema de automação requer alguns pré-requisitos. Do ponto de vista humano, deve-se garantir plena colaboração de todos os setores envolvidos, domínio dos processos metalúrgicos em questão, familiaridade do pessoal de desenvolvimento com programação digital, cálculo numérico, diferencial e integral, estatística, inteligência artificial etc. Quanto aos requisitos técnicos, os modelos matemáticos devem ser suficientemente precisos sem exigirem recursos digitais exagerados; o equipamento a ser automatizado deve dispor de instrumentação rápida e precisa, sistemas de aquisição digital de dados, processadores adequadamente dimensionados e sistemas para acionamento remoto dos equipamentos.

### SIMULAÇÃO DE PROCESSO

Na Cosipa já foram desenvolvidos modelos matemáticos para o controle e simulação de processos como reaquecimento de placas, evolução da temperatura do esboço ao longo da laminação, esquema de passes, minimização do defeito ponta alta, controle de planicidade e desempenho a quente. Eles já

**Figura 1 - Comparação entre os valores calculados pelo presente modelo de aquecimento de placas e os obtidos na realidade**



foram aferidos para algumas condições de processo, apresentando resultados animadores.

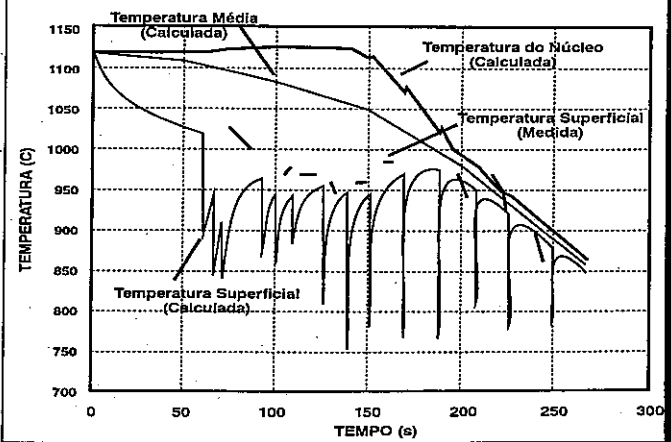
### Modelo de aquecimento de placas

O modelo de aquecimento de placas nos fornos é aplicado na determinação das temperaturas das diversas zonas, otimizando o tempo de permanência das placas dentro dos equipamentos e reduzindo o consumo de energia. Os cálculos são feitos levando-se em conta as dimensões das placas, dos tipos de aço e das temperaturas objetivadas no processo subsequente de laminação.

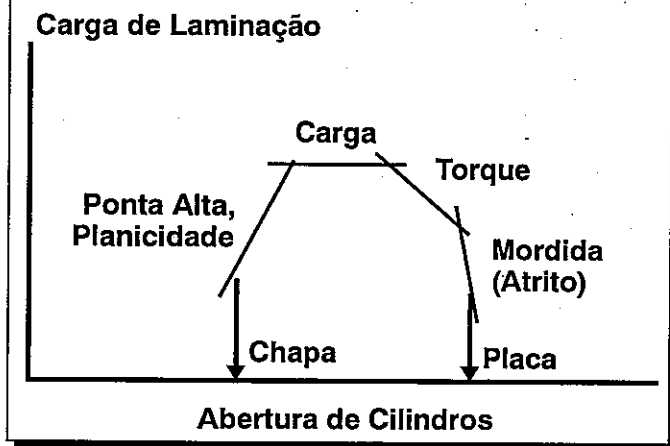
O balanço de energia considerado no modelo de aquecimento foi concebido de forma que o calor cedido à placa por radiação é igual ao calor absorvido pela mesma por condução. O calor cedido à placa por convecção e o calor perdido para as longarinas são considerados desprezíveis quando comparados com o calor obtido por radiação.

A condução no material, devido à geometria da placa, é considerada unidimensional. As equações diferenciais obtidas

**Figura 2 - Comparação entre os resultados calculados pelo modelo para cálculo do perfil térmico do esboço e os medidos em sua superfície pelo pirômetro de infra-vermelho**



**Figura 3 - Etapas determinantes do esquema de passes ao longo da laminação do esboço**



foram resolvidas pelo método das diferenças finitas. A *Figura 1* mostra a comparação entre os resultados obtidos pelo presente modelo e os reais, em um dos testes de aferição efetuados.

**Modelo do perfil térmico do esboço**

Um dos fatores principais que influenciam o processo de laminação é a correta determinação do perfil térmico do esboço durante o esquema de passes. Com o conhecimento desse perfil é possível prever uma temperatura representativa de deformação que estime corretamente a carga de laminação através da determinação precisa da resistência à deformação a quente do esboço laminado.

Para esse modelamento foram considerados os diversos mecanismos de transmissão de calor que atuam na direção de espessura do esboço durante o processo de laminação. São eles: condução no interior do esboço, perda por radiação, perda por convecção natural e perda pelos jatos de descamação. Do mesmo modo que no modelo de aquecimento, o método de resolução das equações diferenciais obtidas foi o das diferenças finitas.

A *Figura 2* permite uma comparação entre os resultados obtidos pelo modelo em questão e as temperaturas reais da superfície do esboço, medidas através de pirômetro infravermelho.

**Modelo para cálculo do esquema de passes**

O modelo matemático para determinação do esquema de passes e, por conseguinte, da posição do parafuso do laminador de chapas grossas - deve considerar os seguintes fatores: dimensões dos produtos, forma, temperatura ao longo da laminação, tipo de aço e características dos equipamentos.

A laminação de chapas grossas é um processo que pode ser subdividido em etapas que possuem individualmente características bem específicas, conforme mostra a *Figura 3*: capacidade de mordida, torque máximo, carga máxima, forma e dimensões objetivadas.

Em termos industriais, podem ser traduzidas como: fases de ajuste de forma, alargamento, esboçamento e acabamento.

O modelo desenvolvido para o laminador de chapas

grossas da Cosipa realiza inicialmente um balizamento das reduções de referência em cada fase, procurando minimizar o número de passes total no esquema de reduções. O cálculo de carga de laminação é feito através do modelo de SIMS, utilizando a equação de resistência à deformação a quente proposta por Misaka. Durante a fase de alargamento são aplicados perfis especiais de espessura em determinados passes, visando maximizar o rendimento metálico através do aumento do grau de retangularidade do esboço final. Em cada passe, a posição correta do parafuso é determinada através da correção da cedagem sofrida pelo laminador, que é controlada através de equações semi-empíricas atualizadas periodicamente.

Durante a fase de esboçamento, a tendência à formação de ponta alta é controlada através da aplicação de passes que atendam a uma determinada faixa de valores do fator de profundidade de deformação  $\underline{m}$ , definido como a razão entre o comprimento do arco de contato e espessura média do esboço.

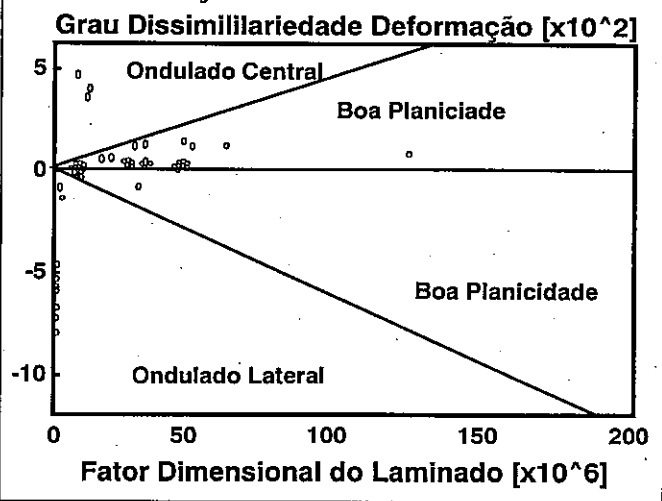
A planicidade do esboço também é controlada através de um modelo matemático, levando-se em consideração a coroa, ou seja, a diferença de espessura, no sentido transversal, entre a borda e o centro do esboço.

Os limites para obtenção de boa planicidade em função das magnitudes das coroas em cada passe de laminação foram determinados pelo ajuste da equação de Shohet-Townsend. A *Figura 4* mostra como o controle da planicidade pode ser feito, dimensionando-se os passes de forma a que os parâmetros da referida equação se enquadrem dentro da faixa de boa planicidade.

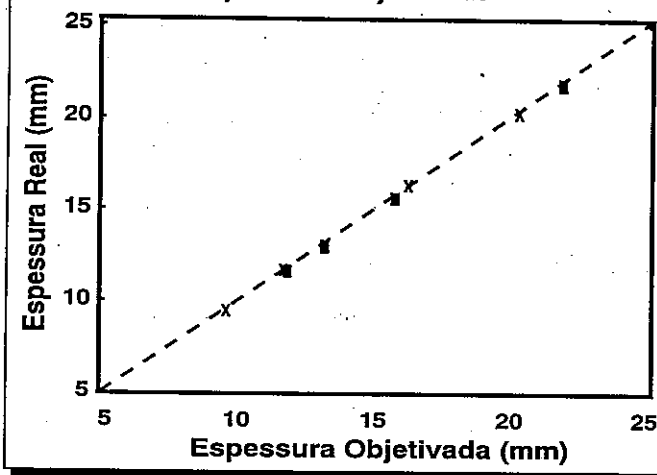
A *Figura 5* mostra os resultados globais do modelo de esquema de passes, em termos da comparação da espessura objetivada no produto e a efetivamente conseguida através de sua aplicação. Observa-se que seu desempenho foi muito bom: a diferença máxima entre a espessura objetivada e a real nestes experimentos foi de 0,19 mm.

A comparação dos valores calculados pelos diversos modelos aqui desenvolvidos e os efetivamente obtidos atestam seu

**Figura 4 - Tipos de planicidade obtidos em função dos parâmetros de laminação, definidos pela relação de Shohet-Townsend**



**Figura 5 - Comparação entre as espessuras reais obtidas na laminação através do modelo matemático de posicionamento do parafuso e as espessuras objetivadas**



bom desempenho. No momento, eles podem ser aplicados de forma eficaz na laminação de aço ao C-Mn.

#### DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Apesar do ótimo nível de precisão dos modelos atualmente desenvolvidos, eles vem sendo aperfeiçoados continuamente, não só para aumentar sua confiabilidade, como também para estender ao máximo sua faixa de aplicação. Desse modo, eles poderão atender ao maior número de produtos possíveis, disseminando amplamente os benefícios da automação de seu processo de fabricação.

Dois desenvolvimentos recentemente implantados merecem destaque:

a) A aferição dos resultados do modelo de reaquecimento de placas, a partir dos dados de temperatura ao longo da espessura de uma placa-teste enfiada, coletados através de um "datalogger" dentro de uma caixa isolada termicamente contendo água e gelos;

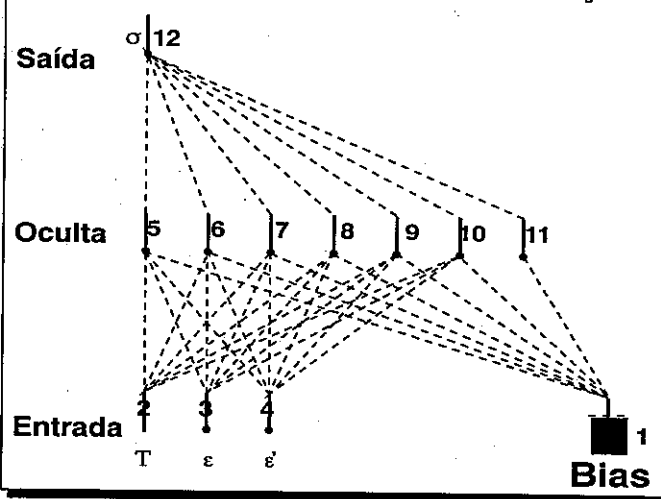
b) Coleta automatizada dos dados relativos à cadeira de laminação, como carga, temperatura, abertura e velocidade dos cilindros, que permitirá aferição plena do modelo para cálculo do esquema de passes.

Vale notar que, além dos benefícios decorrentes do aperfeiçoamento dos modelos matemáticos, esses dois desenvolvimentos permitirão um controle de processo muito mais apurado, contribuindo imediatamente para a otimização do processo da laminação de chapas grossas.

Uma das linhas de trabalho atuais consiste no estabelecimento de relações entre a resistência à deformação a quente dos aços, sua composição química e os parâmetros de processo, em termos de temperatura, grau e velocidade de deformação. Espera-se com isso melhorar a precisão do modelo que efetua o cálculo de carga de laminação, adequando-se às condições específicas da Cosipa.

Outro desenvolvimento em curso é a aplicação de técnicas de Inteligência Artificial no modelamento dos processos da

**Figura 6 - Rede neural utilizada para se modelar a resistência à deformação a quente a partir da temperatura, grau e velocidade de deformação**



laminação de chapas grossas, como, por exemplo, a utilização de redes neurais artificiais. A principal vantagem desta abordagem específica é o fato das redes neurais extraírem o conhecimento da massa de dados que lhes é fornecida, sem que seja necessário consumir tempo e trabalho na programação de um algoritmo tradicional.

Foram obtidos bons resultados com o emprego desta técnica para o cálculo da resistência à deformação a quente de aços, do esquema de passes, da evolução das temperaturas ao longo da espessura das placas durante seu aquecimento, no controle do defeito ponta alta e do grau de planicidade do produto.

No caso específico do modelamento da resistência à deformação a quente, o uso de uma rede neural como a mostrada na Figura 6 permitiu que se obtivesse nível de precisão superior à qualquer equação constitutiva empírica com o mesmo objetivo, como por exemplo, Misaka, Shida, Tegart, Hajduk, Samanta, Tarokh, Rossard e Jaeckel.

Uma espetacular vantagem adicional é o fato de que a rede neural permite modelar toda a curva resistência à deformação a quente versus grau de deformação a quente, que normalmente envolve três etapas: encruamento, amaciamento e patamar. Nenhuma equação constitutiva consegue modelar simultaneamente essas três regiões. Na melhor dessas hipóteses, é necessário utilizar uma equação para cada etapa. O ajuste estatístico delas, contudo, é complicado.

Em alguns casos, a seleção dos dados para as respectivas equações fica difícil devido à transição pouco nítida entre as diversas regiões da curva. Uma vez que a rede neural não exige a definição de uma equação formal - apenas os dados a modelar o ajuste de toda a curva é feito de forma automática.

Desenvolvimentos futuros a serem feitos incluem a quantificação plena dos esquemas de passe da laminação controlada de aços microligados, a evolução microestrutural do produto, o estabelecimento de relações quantitativas entre microestrutura e propriedades mecânicas e o emprego intensivo de novas técnicas de Inteligência Artificial, como sistemas especialistas, lógica nebulosa ("fuzzy logic") e física qualitativa. □