

518.87:681.3:621.771.28

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA O
SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DO LAMINADOR DE CHAPAS GROSSAS DA COSIPA

Jackson Soares de Souza Reis (1)
Marcos Antonio Stuart (1)
Vicente Bruno Formica (2)
Nilton Tuneshi Sugahara (3)
José Herbert Dolabella da Silveira (4)
Antonio Augusto Gorni (5)

- (1) Engenheiro Metalurgista, Gerência de Suporte Técnico de Laminação da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA
- (2) Engenheiro Metalurgista, Gerência de Assistência Técnica a Clientes da Laminação da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA
- (3) Engenheiro Mecânico, Gerência de Suporte Técnico de Laminação da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA
- (4) Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Gerência de Laminação de Chapas Grossas da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA
- (5) Engenheiro de Materiais, M.Eng., Gerência de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA

RESUMO

A implantação do sistema de automação do laminador de chapas grossas da COSIPA vem requerendo o desenvolvimento de modelos matemáticos para descrever e quantificar os diversos processos envolvidos. São eles: reauecimento de placas, evolução térmica do esboço, esquema de passes da laminação (incluindo controle de planicidade e ocorrência de ponta alta ou baixa) e desempenamento a quente do laminado. Este trabalho descreve a metodologia empregada na elaboração desses modelos, os quais apresentaram grau de precisão satisfatório em relação aos dados reais da linha. Eles estão sendo continuamente refinados, através de sua aferição com dados coletados automaticamente e do emprego de técnicas modernas de Inteligência Artificial como, por exemplo, redes neurais artificiais.

INTRODUÇÃO

O mercado mundial de chapas grossas é muito competitivo e seletivo. Para que um fabricante possa se manter em posição de destaque é providencial que ele ofereça com excelentes níveis de qualidade e aceitação, a custos compatíveis internacionalmente.

A automação do processo de laminação de chapas

grossas insere-se nesse contexto, já que é um dos principais itens de evolução que promove melhoria e aprimoramento tanto no processo de produção como no desempenho do produto. Ele também possibilita o controle do processo; a estabilidade da qualidade do produto; a administração, o planejamento e a programação da produção.

A necessidade de investimentos na automação da laminação é justificada mesmo em épocas de crise, uma vez que ela possibilita o aumento de produtividade, melhoria no rendimento, aperfeiçoamento na performance operacional e diminuição dos custos de produção. Tudo isto implica num significativo ganho na relação custo/benefício da produção de chapas grossas.

A evolução sistemática de desempenho do processo de laminação de chapas grossas requer que a operação da linha seja uniforme, confiável, previsível e independente de alterações pessoais. Isto é alcançado quando se tem um sistema automatizado de boa performance, baseado na utilização de modelos matemáticos relacionados aos fenômenos que ocorrem durante a laminação. Estes fenômenos são:

- a) Aquecimento das placas;
- b) Deformação durante os passes de laminação;
- c) Resfriamento dos esboços durante a laminação;
- d) Desempenho a quente dos esboços; e
- e) Evolução microestrutural.

O sistema de automação deve ter a capacidade de se auto-corrigir e se auto-adaptar às condições operacionais vigentes durante a operação "on-line", placa a placa, e também poder ser utilizado "off-line", com o controle da operação sendo realizado manualmente. As principais características dos equipamentos que compõem a linha de laminação da fábrica de chapas grossas da COSIPA estão mostradas na tabela 1.

A intenção deste trabalho é mostrar, preliminarmente, o estado da arte e a interligação dos vários modelos matemáticos no processo de automação da laminação de chapas grossas da COSIPA, e descrever a configuração a ser adotada para o sistema de automação.

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO

O sistema de automação do processo de laminação de chapas grossas escolhido na COSIPA é baseado no modelo CIM, "Computer Integrated Manufacturing". Este modelo já é amplamente utilizado em usinas japonesas [1] e apresenta as seguintes vantagens:

- a) Hierarquia de funções em níveis;
- b) Descentralização;
- c) Flexibilidade; e
- d) Integração.

A configuração adotada nesse sistema de automação é composta por um computador supervisor ("workstation"), interligado ao computador central IBM-3090, uma rede de comunicação padrão ETHERNET, um computador de processo, terminais, impressoras, unidades remotas inteligentes de entrada e saída e concentradores de dados.

MODELOS MATEMÁTICOS PARA AUTOMAÇÃO

O processo de laminação de chapas grossas tem como requisito básico produzir laminados nas dimensões e formas desejadas pelos usuários, dentro de padrões de tolerâncias e de propriedades mecânicas adequados à aplicação específica do material, sem comprometer os limites operacionais da linha de laminação.

A complexidade da interação entre as variáveis de processo, as dimensões e o formato dos laminados, as propriedades mecânicas e os limites operacionais para produção de chapas grossas impõem que a combinação ótima entre estes fatores seja obtida mais facilmente quando os fenômenos metalúrgicos e mecânicos são previamente conhecidos através de modelos matemáticos compatíveis com 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, esquemas de redução por passes, composição química do aço e características dos equipamentos.

A figura 1 mostra esquematicamente como ocorrem as correlações entre as variáveis da laminação de chapas grossas e a obtenção das dimensões, forma e propriedades mecânicas nos produtos [2]. Verifica-se que os modelos podem ser subdivididos em modelos de processo ou metalúrgicos.

Os modelos de processo correlacionam as condições operacionais com os parâmetros de controle em cada equipamento da linha de produção. Os modelos metalúrgicos correlacionam esses parâmetros com a evolução microestrutural e as propriedades mecânicas obtidas nos produtos de chapas grossas.

Os modelos descritos neste trabalho são os de processo de aquecimento de placas, de temperatura de laminação, de esquemas de reduções na laminação e de desempenho a quente de esboços.

MODELO PARA O AQUECIMENTO DE PLACAS

O modelo de aquecimento de placas nos fornos é aplicado na determinação das temperaturas das zonas de aquecimento, otimizando o tempo de permanência das placas no interior do forno de aquecimento e reduzindo o consumo de energia, em função das 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 pode ser resumido pela seguinte relação: o calor cedido à placa por radiação é igual ao calor absorvido pela placa por condução. O calor cedido à placa por convecção e o calor perdido para as longarinas são considerados desprezíveis quando comparados com o calor transmitido por radiação. A condução de calor no material é considerada como sendo unidimensional, em função da configuração geométrica da placa.

As equações básicas utilizadas no modelo de aqueci-

mento de placas, assumindo-se as hipóteses simplificadoras acima citadas, são descritas a seguir:

a) Condução de calor na placa:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

sendo: ρ = densidade;
 C_p = calor específico;
 k = condutividade térmica;
 T = temperatura;
 t = tempo;
 x = posição ao longo da espessura.

b) Condição de contorno na superfície:

$$H_{rd} (T_f - T_s) = k \left(\frac{dT}{dx} \right)_{sup} \quad (2)$$

sendo: H_{rd} = coeficiente de transmissão de calor por radiação;
 T_f = temperatura da zona de aquecimento;
 T_s = temperatura superficial da placa.

c) Coeficiente de transmissão de calor por radiação:

$$H_{rd} = F S \frac{(T_f^4 - T_s^4)}{(T_f - T_s)} \quad (3)$$

sendo: F = fator de forma entre placa e forno;
 S = Constante de Stefan-Boltzmann

Utilizou-se o método de diferenças finitas para se resolver a equação diferencial de condução de calor. A equação básica é:

$$T_{t+1,n} = \frac{T_{t,n-1}}{M} + \frac{T_{t,n} (M-2)}{M} + \frac{T_{t,n+1}}{M} \quad (4)$$

onde:

$$M = \frac{\rho C_p \left(\frac{h}{x} \right)^2}{\Delta t} \quad (5)$$

sendo: h = Espessura da placa;
 X = Número de divisões;
 Δt = intervalo de tempo da interação.

MODELO PARA A EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA DO ESBOÇO

Um dos fatores de influência mais importantes do processo de laminação é o perfil térmico do esboço ao longo da laminação. Logo, é de fundamental importância que o mesmo possa ser calculado de forma precisa.

Com o conhecimento do perfil térmico do esboço, é possível fazer uma previsão representativa da efetiva temperatura de deformação, que é um parâmetro de vital importância para o cálculo da resistência à deformação a quente a qual, por sua vez, define a carga de laminação do passe. Uma proposta para a definição da temperatura representativa de deformação [4] está na seguinte fórmula:

$$T = a + b T_s \quad (6)$$

sendo: T = Temperatura representativa;
 T_s = Temperatura superficial do esboço;
 a, b = Constantes empíricas.

O modelo aqui descrito considerou os seguintes mecanismos de transmissão de calor através da direção da espessura do esboço [5]:

a) Condução no interior do esboço:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = k \frac{dT}{dx} + \Delta W \quad (7)$$

onde:

$$\Delta W = \sigma \ln \left(\frac{h_i}{h_f} \right) \quad (8)$$

sendo: ΔW = Energia gerada na deformação;
 σ = Resistência à deformação a quente do aço;
 h_i = Espessura de entrada do esboço;
 h_f = Espessura de saída do esboço.

b) Perda por radiação e convecção natural

$$k \left(\frac{dT}{dx} \right)_{sup} = \lambda S (T_s^4 - T_a^4) + H_{cv} (T_s - T_a) \quad (9)$$

sendo: λ = Emissividade;
 T_a = Temperatura ambiente;
 H_{cv} = Coeficiente de transmissão de calor por convecção.

c) Perda na condução pelos cilindros

$$k \left(\frac{dT}{dx} \right)_{sup} = H_{cc} (T_s - T_c) \quad (10)$$

sendo: H_{cc} = Coeficiente de transmissão de calor pelo cilindro;
 T_c = Temperatura do cilindro.

d) Perda na descamação

$$k \left(\frac{dT}{dx} \right)_{sup} = H_w (T_s - T_a) \quad (11)$$

onde: H_w = coeficiente de transmissão de calor por convecção forçada.

Analogamente ao modelo de aquecimento de placas, o método para resolução dessas equações foi o das diferenças finitas.

MODELO PARA O ESQUEMA DE PASSES NA LAMINAÇÃO

O modelo matemático para determinação do esquema de passes - vale dizer, do posicionamento do parafuso do laminador de chapas grossas - deve considerar os seguintes fatores: dimensões dos produtos, forma, temperatura, tipo de aço e características dos equipamentos.

A laminação de chapas grossas é um processo que pode ser subdividido em etapas que possuem características individuais bem específicas. Esses estágios são, sucessivamente, limitados por capacidade de mordida, torque máximo, carga máxima e forma e dimensões objetivados no laminado. Eles são usualmente denominados como *passo 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 a ser aplicado [6].

As equações básicas utilizadas no cálculo da carga de laminação e da resistência à deformação a quente foram desenvolvidas por, respectivamente, *Sims* e *Misaka*. Essas equações são:

$$P = 1,155 W \sigma Q_p \sqrt{R (H_1 - H_2)} \quad (12)$$

e

$$\sigma = e^{\left[(0,126 - 1,75 \% C - 0,594 \% C^2) \cdot \frac{(2851 + 2968 \% C - 1120 \% C^2)}{(7 \cdot 273)} \right]} \epsilon^{0,21} \dot{\epsilon}^{0,13} \quad (13)$$

sendo: P = Carga de laminação no passe;
 σ = Resistência à deformação a quente;
W = Largura do esboço;
 Q_p = Fator geométrico;
R = Raio dos cilindros de trabalho;
T = Temperatura do esboço;
% C = Teor de carbono do aço;
 ϵ = grau de deformação verdadeira;
 $\dot{\epsilon}$ = velocidade de deformação.

Em cada passe, a determinação do correto posicionamento do parafuso é feita considerando-se a cedagem sofrida pelo laminador. Ela depende dos parâmetros de laminação e das características físicas dos equipamentos [7]. A equação básica para seu cálculo é:

$$Y_{tot} = a + b Y_{col} + c Y_p + d Y_{ts} + e Y_{ti} + f Y_c + g Y_{ct} + h Y_{te} + i Y_{cm} + j Y_{man} \quad (14)$$

sendo: Y_{tot} = Deformação elástica total do laminador;
 Y_{col} = Deformação elástica da coluna;
 Y_p = Deformação elástica do parafuso;
 Y_{ts} = Deformação elástica do travessão superior;
 Y_{ti} = Deformação elástica do travessão inferior;
 Y_c = Deformação elástica do cilindro de encosto;
 Y_{ct} = Deformação elástica do cilindro de trabalho;
 Y_{te} = Achatamento entre cilindro de trabalho e de encosto;
 Y_{cm} = Achatamento entre cilindro de trabalho e laminado;
 Y_{man} = Deformação elástica dos mancais;
a-j = Constantes empíricas.

O modelo para cálculo do esquema de passes também deve considerar as consequências da deformação no formato do laminado. Foi verificado que a ocorrência de *ponta alta/ponta baixa* (ou seja, encurvamento das pontas do esboço) é mais freqüente para a seguinte condição geométrica:

$$1,2 \leq m \leq 2,0 \quad (15)$$

onde:

$$m = \frac{3 \sqrt{R(h_i - h_f)}}{(h_i + 2 h_f)} \quad (16)$$

O grau de intensidade da ponta formada - GP - pode ser expresso pela seguinte equação:

$$GP = a m + b h_f + c m^2 + d h_f^2 + e m h_f \quad (17)$$

A planicidade do esboço também é controlada através do 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, resultante dos passes de redução. Os limites para obtenção de boa planicidade, em função dos valores das coroas em cada passe de laminação, é dada pela seguinte expressão, deduzida por *Shojet & Townsend*:

$$a \left(\frac{h_f}{W} \right)^2 \leq \left(\frac{C_i - C_f}{h_i - h_f} \right) \leq b \left(\frac{h_f}{W} \right)^2 \quad (18)$$

sendo: h_f = Espessura final do laminado;
 C_f = Coroa final do esboço;
 h_i = Espessura do esboço no passe i ;
 C_i = Coroa do esboço no passe i .

O modelo matemático para cálculo do esquema de passes também engloba sistemas já desenvolvidos para a correção do chamado efeito *barril* nas bordas laterais [10] e nas pontas dos esboços [11] durante o esquema de passes.

MODELO PARA O ESQUEMA DE PASSES NA DESEMPENADEIRA A QUENTE

O processo de desempenho a quente de esboços de chapas grossas pode ser modelado matematicamente em função das características do equipamento, condições operacionais e grau de planicidade do laminado.

A equação básica utilizada pelo modelo para cálculo do esquema de passes na desempenadeira a quente é [12]:

$$\frac{\tau_{real}}{\tau_{calc}} = a - b \frac{T}{h} \quad (19)$$

sendo: τ_{real} = Torque de desempenho real;

T_{calc} = Torque de desempenho calculado;
 L = Distância entre os rolos da desempenadeira;
 h = Espessura do laminado.

Na verdade, essa razão entre os torques real e calculado é função tanto do equipamento quanto do nível de intensidade do defeito apresentado pelo esboço.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A figura 2 mostra os resultados obtidos com o modelo matemático para cálculo da temperatura do esboço durante o processo de laminação de chapas grossas. Verifica-se que a curva calculada para a temperatura superficial do esboço apresenta boa concordância com a efetivamente medida na área industrial. A correlação entre as temperaturas fica mais evidente a medida que a espessura do esboço diminui, pois, neste caso, a hipótese de transmissão de calor unidimensional em que se baseia o modelo torna-se mais consistente.

Os resultados experimentais do modelo para cálculo do esquema de passes demonstraram seu ótimo desempenho no sentido de se produzir esboços com espessura e largura dentro das tolerâncias objetivadas, conforme mostram as figuras 3 e 4, respectivamente. A diferença máxima entre a espessura objetivada e a real nestes experimentos foi de 0,19 mm; este valor no caso da largura foi de 40 mm.

As figuras 5 e 6 mostram os resultados obtidos para os modelos para previsão da forma do laminado durante a laminação, em termos da formação de ponta alta/baixa e planicidade, respectivamente.

Estes resultados mostram a ampla confiabilidade dos métodos utilizados no modelamento matemático do processo de laminação de chapas grossas.

DESENVOLVIMENTOS ADICIONAIS

Apesar do ótimo nível de precisão dos modelos atualmente desenvolvidos, deve-se ter em mente que o aperfeiçoamento do processo de laminação de chapas grossas na COSIPA é contínuo, buscando-se cada vez mais a associação redução de custos com aumento do nível de qualidade. No caso específico da automação da linha, os modelos atuais vem sendo continuamente aperfeiçoados, de modo a atender maior número possível de produtos e estender ao máximo sua faixa de aplicação, disseminando ao máximo seus benefícios.

Dois desenvolvimentos recentemente implantados merecem destaque. Um delas é a aferição dos resultados do modelo de resaquecimento de placas através da coleta do perfil de temperaturas durante o processo de enformamento através da utilização de um "data-logger" selado hermeticamente dentro de uma caixa refratária com gelo. O outro é a implantação da coleta automatizada de dados relativos à cadeia de laminação, como carga, temperatura, abertura e velocidade dos cilindros, o que permitirá aferição plena do modelo para cálculo do esquema de passes.

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 da 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. Esses dados vem sendo levantados através de ensaios de torção a quente. Além disso, estão sendo levantadas as temperaturas críticas para a laminação controlada de aços microligados - Temperatura de Não-Recristalização (T_{NR}), A_1 e A_2 - para se embasar tecnologicamente este processo industrial.

Outro desenvolvimento em curso é a aplicação de técnicas de Inteligência Artificial no modelamento dos processos de 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 a partir da massa de dados que lhes foi fornecida, sem que seja necessário consumir tempo e trabalho na programação de um algoritmo tradicional. Foram obtidos resultados promissores no modelamento da resistência à deformação a quente [13], do reaquecimento de placas, controle de ponta alta e planicidade, e cálculo do esquema de passes [14].

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

CONCLUSÕES

A implantação da automação em processos siderúrgicos - e, particularmente, na laminação de chapas grossas - vem se revelando como um fator decisivo para se manter a competitividade de uma usina através da redução do custo de produção e aumento da qualidade do produto final, frutos de uma operação mais confiável, com um mínimo de desperdício de insumos e desvios.

Foram descritos neste trabalho os desenvolvimentos efetuados até o momento para a automação da Linha de Chapas Grossas da COSIPA. Os modelos já desenvolvidos - reaquecimento de placas, evolução térmica do laminado, esquema de passes, desempenho a quente - mostraram resultados coerentes com a prática industrial.

Há, contudo, um longo caminho a percorrer para que a automação possa ser estendida de forma rotineira à toda gama de produtos da laminação de chapas grossas. Por isso mesmo, projetos relativos ao aperfeiçoamento dos modelos matemáticos já existentes continuam sendo executados para atender a essa necessidade, dentro de uma filosofia de melhoria permanente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANON. Outline of Plate Production Control System at Mizushima Works.

- Relatório Interno da Usina de Mizushima, Kawasaki Steel, Dec. 1986.
2. WATANABE, Y. e outros. ISIJ International, March 1992, 405*413.
 3. FORMICA, V. B. Bases para o Modelo Matemático de Aquecimento de Placas. Relatório Interno da COSIPA, 1992.
 4. SILVEIRA, J. H. D. Modelo para Determinação da Temperatura de Deformação em Função da Resistência à Deformação a Quente e da Temperatura Superficial do Material na Laminação de Chapas Grossas. XV Seminário Interno de Laminação da COSIPA, 1992.
 5. FORMICA, V. B. Modelo Matemático de Previsão de Temperatura durante a Laminação de Chapas Grossas. XV Seminário Interno de Laminação da COSIPA, Outubro 1992.
 6. SUGAHARA, T. e outros. In: I Semana da Conformação. Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Joinville, 1993, 173-186.
 7. SILVEIRA, J. H. D. & SUGAHARA, T. In: Determinação da Deformação Elástica durante o Passe de Redução em um Laminador de Chapas Grossas. XIV Seminário Interno de Laminação da COSIPA, 1993.
 8. GORNI, A. A. e outros. In: Seminário de Laminação. Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Porto Alegre, 1992, 299-318.
 9. REIS, J. S. S. e outros. In: 48º Congresso Anual da A.B.M. Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Rio de Janeiro, 1993.
 10. BONILHA, F. M. e outros. In: Seminário de Laminação. Anais. Associação Brasileira de Metais, Recife, 1984.
 11. REIS, J. S. S. e outros. In: Seminário de Laminação. Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Porto Alegre, 1992, 365-378.
 12. SILVEIRA, J. D. D. & GORNI, A. A. Correlação das Variáveis do Processo de Desempeno a Quente de Chapas Grossas. XIII Seminário Interno de Laminação da COSIPA, 1990.
 13. GORNI, A. A. In: I Semana de Conformação. Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Joinville, 1993, 267-286.
 14. GORNI, A. A. In: Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais. Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 1994.

FABRICAÇÃO	Fabricante	Stein Surface	
	Tipo	Walking-Bean de abóbada radiante	
	Capacidade	2 X 130 Ton/h	
	Dimensões	8100 X 30500 mm	
	Combustível	Gás de coqueria / óleo combustível	
LAMINAÇÃO	Tipo	Quádruplo reversível	
	Fabricante	M.H.I.	
	Potência	2 X 6000 HP, D.C.	
	Carga máxima	8000 Ton	
	Espessura de Laminação	6,00 à 150,00 mm	
	Mesa	4100 mm	
	A.G.C.	Elétrico	
	Medidor de Espessura	Raio Gama	
	Velocidade	40 à 100 RPM	
	GROSSAS	Cilindro de Trabalho	Material
Diâmetro			970 à 1070 mm
Cilindro de Encosto		Material	Aço forjado
		Diâmetro	1800 à 2000 mm
Módulo de rigidez	700 Ton/mm		
DESEMPENHO	Fabricante	M.H.I.	
	Tipo	Quádruplo reversível	
	Potência	2 X 200/400 HP	
	Espessura de Desempeno	6,00 à 80,00 mm	
	Rolos de trabalho	6 Sup/5 Inf. - diâmetro 230 mm	

Tabela (1) - Características principais dos equipamentos da linha de laminação da fábrica de chapas grossas da COSIPA.

MODELOS PARA AUTOMAÇÃO

- Prop. Mecânicas - $f(\text{Microestrutura})$
- Microestrutura - $f(\text{Parâmetros Laminação})$ - T, C.Q., ϵ , δ
- Parâmetros - $f(\text{Variáveis Laminação})$ - P, C.Q., RPM, R, Equip.
- Forma - $f(\text{Variáveis Laminação})$

Fatores Essenciais: Condições Operacionais e Composição Química.

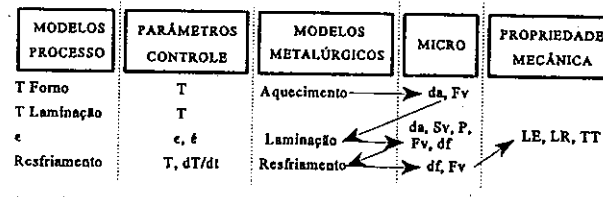


Figura 1: Correlação entre as variáveis de laminação nos modelos de processo e metalúrgicos na laminação de chapas grossas.

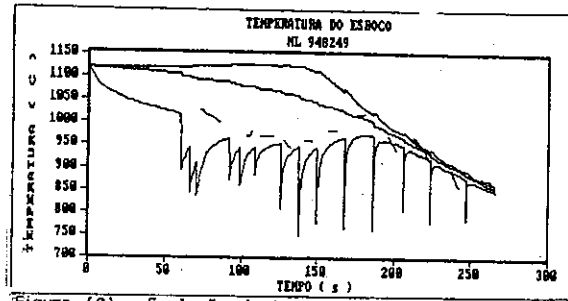


Figura (2) - Evolução da temperatura do esboço durante a laminação.

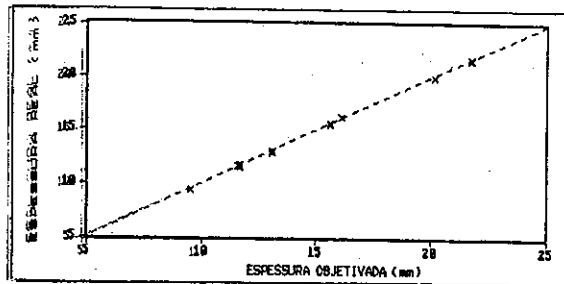


Figura (3) - Comparação entre as espessuras reais obtidas na laminação através do modelo matemático de posicionamento do parafuso e as espessuras objetivadas.

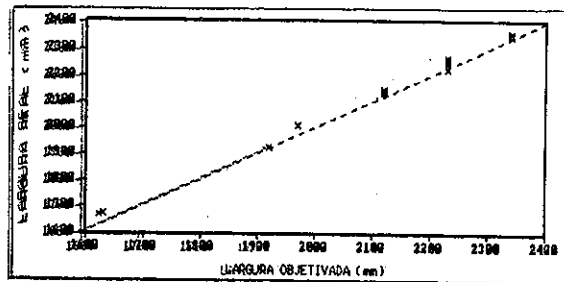


Figura (4) - Comparação entre as larguras reais obtidas na laminação através do modelo matemático de posicionamento do parafuso e as larguras objetivadas.

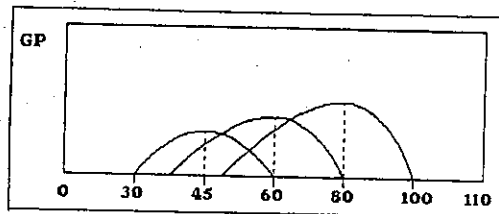


Figura (5) - Grau de formação da ponta do esboço durante a laminação em função do esquema de passe.

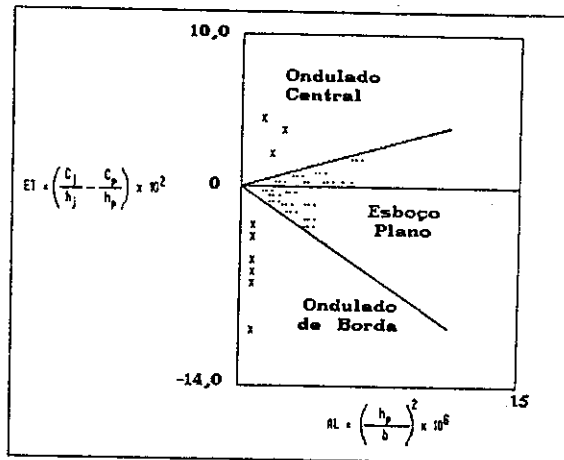


Figura (6) - Resultado de planicidade em função das variáveis do processo de laminação.