

MODELAMENTO MATEMÁTICO DA LAMINAÇÃO: DE FICÇÃO CIENTÍFICA A FERRAMENTA PARA A CAPACITAÇÃO INDUSTRIAL ¹

Antonio Augusto Gorni²

Resumo

Ao contrário do que normalmente se imagina, a automação dos processos de laminação não se justifica economicamente em função da eventual redução da mão de obra necessária, mas sim pela fabricação de produtos com melhor precisão dimensional e consistência de propriedades mecânicas, seguindo-se pela redução nos custos operacionais e os decorrentes de sucateamento e degradação de qualidade do produto. A esses incentivos alia-se a crescente disponibilidade de recursos computacionais relativamente baratos. Esse panorama, que vem predominando há mais de vinte anos, motivou um enorme progresso no desenvolvimento dos modelos matemáticos sobre a laminação. Hoje a maior limitação ao desempenho desses modelos não mais é matemática, mas decorre do desconhecimento sobre aspectos específicos dos fenômenos metalúrgicos, térmicos e interfaciais do processo de laminação. A maior disponibilidade de dados também vem requerendo a utilização de ferramentas matemáticas e estatísticas complexas para se validar as informações conseguidas e extrair conhecimentos fidedignos sobre o processo. Esse quadro de crescente sofisticação tecnológica representa mais uma pesada necessidade a ser atendida pelas equipes de suporte técnico das usinas, já bastante enxutas após a racionalização em busca da competitividade. Uma das possíveis soluções para esse impasse estaria numa interação mais produtiva com a comunidade acadêmica metalúrgica.

Palavras-Chave: Laminação, Automação, Modelamento Matemático

¹ *Keynote Paper* a ser apresentado ao 60º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais-ABM, Belo Horizonte (MG), 25 a 28 de Julho de 2005.

² Membro da ABM. Engenheiro de Materiais, M. Eng, Dr. Eng., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: gorni@cosipa.com.br

- Motivação para o Desenvolvimento de Modelos Matemáticos para Laminação

Os modelos matemáticos para laminação podem ser desenvolvidos por diversos motivos [1]: para embasar o processo de seleção e dimensionamento de equipamentos; na otimização de processos ambiente *off-line*; e no controle *on-line* do processo, incorporados no sistema de automação da linha, visando aumentar a consistência operacional. Este último objetivo é, de longe, a maior motivação para o desenvolvimento desses modelos. Note-se que neste caso os modelos têm de ser simplificados para permitir sua execução em tempo hábil durante o processo de laminação. Isto eventualmente pode custar alguma perda de precisão pelos modelos, desvantagem que está paulatinamente desaparecendo à medida que computadores cada vez mais poderosos surgem e permitem a implementação de modelos *on-line* mais complexos.

Ao contrário do que normalmente se imagina, a pretensa economia de mão de obra decorrente da implantação da automação não é um argumento econômico decisivo para sua implementação. No caso de países com mão de obra relativamente barata, como é o caso do Brasil, essa economia é irrisória, resultando em tempos de retorno do investimento excessivamente longos. O ganho financeiro decorrente da implantação da automação na laminação está diretamente ligado ao atendimento pleno das expectativas do cliente quanto ao produto fornecido, na forma de maior precisão dimensional, melhor planicidade e ausência de distorções causadas por tensões residuais entre outros fatores [2], características imprescindíveis no caso de clientes que adotaram novos processos de manufatura, como corte/soldagem a laser e manipulação robotizada de peças [3]. Benefícios consideráveis também são conseguidos em função da otimização da operação do equipamento, na forma de menores índices de sucateamento e desvios de produtos para qualidades inferiores, maior disponibilidade do equipamento, economia de combustíveis e insumos, etc.

- Modelos Matemáticos para Laminação Usados no Controle de Processo

O controle automatizado de processos de um Laminador de Tiras a Quente (LTQ), um dos casos mais complexos existentes na área de conformação de metais, é feito em vários níveis, numerados de 3 até 0, os apresentam complexidade decrescente e velocidade de atuação crescente. A figura 1 mostra esquematicamente a Laminação de Tiras a Quente. Diversos modelos matemáticos, executados no chamado Nível 2, permitem definir os parâmetros operacionais objetivados de cada equipamento [4].

Reaquecimento de Placas. Este equipamento tem como objetivo aquecer as placas até a temperatura objetivada, garantindo seu encharque térmico homogêneo da forma mais econômica e ecológica possível, dentro de patamares adequados de produtividade. Uma vez que o tempo de reaquecimento das placas é relativamente longo, entre três e quatro horas, o tempo de execução dos cálculos do modelo matemático geralmente não é crítico. Assume-se que o aquecimento é proporcionado basicamente pela radiação emitida pelas paredes do forno, com alguma contribuição advinda da convecção proporcionada pela atmosfera circulante; o aquecimento da placa a partir do ambiente externo se faz por condução. Utiliza-se geralmente o método de diferenças finitas para o cálculo do encharque térmico das placas, embora mais recentemente o método de elementos finitos tenha sido considerado em função da maior precisão que ele proporciona. Os pontos críticos para a precisão do modelo incluem simplificações

como a adoção de aquecimento simétrico, fatores de forma para radiação, valores de emissividade, não-consideração dos pontos de resfriamento localizados decorrente do apoio da placa em *skids* refrigerados a água, etc. [5]. A verificação do grau de acerto desse modelo pode ser feita através do reaquecimento de placas instrumentadas, mas somente em casos bem específicos, dado o alto custo e dificuldade em se efetuar esse experimento. Essa verificação é viabilizada de forma rotineira através da análise dos dados de carga ou potência de laminação provenientes da última cadeira de esboçamento. Essa referência indireta geralmente é mais precisa do que a medição direta da temperatura da placa após o desenformamento, já que esta medida pode ser afetada pela carepa presente na superfície da placa; além disso, mesmo que se disponha da temperatura superficial correta, esse dado não permite determinar o perfil de temperaturas real existente ao longo da espessura da placa [6].

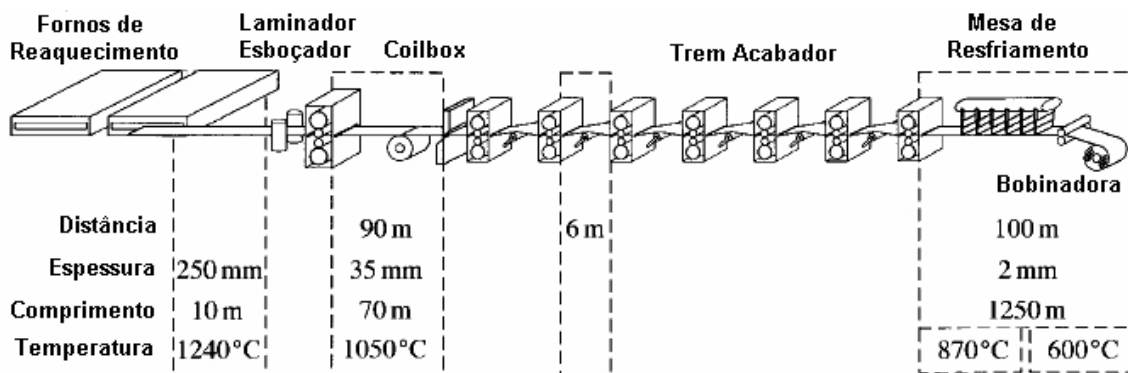


Figura 1: Diagrama esquemático da Laminação de Tiras a Quente [4].

Evolução da Temperatura do Esboço ao Longo da Laminação. A temperatura do esboço é um dado de extrema importância para o cálculo de diversos parâmetros operacionais, como sua resistência à deformação a quente e evolução microestrutural. Por essa razão sua evolução ao longo do processo deve ser determinada de forma precisa, levando-se em conta os vários fenômenos que afetam a temperatura do esboço. Por um lado há o resfriamento causado pela radiação ao ar, jatos de água das descarepações e refrigeração de cilindros, além da condução para os cilindros. Por outro, há também o aquecimento adiabático que ocorre pela aplicação da deformação e pela fricção com os cilindros. Geralmente se usa o método das diferenças finitas para se calcular numericamente a evolução da temperatura ao longo da espessura do esboço. Aqui surge um problema inerente ao método: uma vez que o tempo de contato entre tira e cilindros de trabalho é muito pequeno, da ordem de frações de segundo, é necessário assumir elementos suficientemente pequenos para se conseguir uma solução precisa. Tal fato, por sua vez, requer a adoção de intervalos de tempo igualmente muito pequenos para se garantir a estabilidade matemática no método. Esses dois fatores aumentam a quantidade de cálculos que se faz necessária, elevando o tempo de execução do modelo [7]. Mas um problema ainda mais sério para a precisão dos resultados de evolução térmica calculados é a grande incerteza no valor do coeficiente de transferência de calor a ser adotado, o qual varia intensamente para uma mesma condição de

medição em função das condições irregulares de adesão da carepa que reveste a chapa de aço aquecida [8].

Carga de Laminação. Trata-se da reação mecânica contra a cadeira decorrente da resistência à deformação do material que está sendo laminado e do atrito entre ele e os cilindros de trabalho. É um parâmetro de fundamental importância para o cálculo das cedagens nas cadeiras de laminação e seus componentes, torques das alongas, potência dos motores de acionamento, coroa e planicidade do laminado. Os fundamentos matemáticos para o cálculo da carga começaram a ser estudados nas primeiras décadas do século XX; já na década de 1940 era proposto o método de Orowan, um dos mais precisos já desenvolvidos. Sua resolução era praticamente impossível naquela época, mas esse problema está se tornando cada vez menor à medida que se dispõe de computadores cada vez mais poderosos a custos cada vez menores. Ainda assim, ficou consagrado para o controle *on-line* de laminadores o uso de modelos matemáticos simplificados a partir do método de Orowan, os quais possuem como fórmula básica

$$P = \bar{\sigma} w \sqrt{R (h_i - h_f)} Q_s$$

onde $\bar{\sigma}$ é a resistência à deformação média do material, w é a sua largura, R é o raio dos cilindros de trabalho, h_i e h_f são, respectivamente, a espessura inicial e final do esboço e Q_s é um fator geométrico deduzido a partir de simplificações do modelo de Orowan, entre as quais se destacam a de Sims, Alexander-Ford e Orowan-Pascoe [1]. O uso desse modelo simplificado é justificado pelo fato de que comparações entre valores de carga de laminação experimentais e os calculados pelos mais diferentes métodos apresentaram dispersão menor do que a verificada entre os próprios valores experimentais! Esse erro experimental decorre das incertezas no perfil de temperatura ao longo da espessura do esboço, na evolução do coeficiente de atrito ao longo do arco de contato e no modelamento matemático da resistência à deformação a quente, que geram erros superiores aos eventualmente associados às simplificações dos modelos matemáticos para cálculo de carga [9].

Resistência à Deformação a Quente. Este é um dado fundamental para o cálculo da carga de laminação, tanto que os primeiros modelos para cálculo da resistência a quente foram desenvolvidos em conjunto com os de carga. Todos os fatores que afetam a microestrutura do material que está sendo laminado se refletem no valor desse parâmetro. Por isso, quanto maior a abrangência do modelo, mais variáveis ele tem de considerar e mais dados ele exigirá para se ajustar uma equação constitutiva precisa. O primeiro modelo matemático para o cálculo da resistência à deformação a quente, desenvolvido por Zjuzin e Hajduk no início da década de 1960, estabelecia esse parâmetro como função da temperatura, grau e velocidade de deformação. Essa simplificação obviamente restringia o campo de aplicação das equações conseguidas. Posteriormente Misaka refinou esse modelo, incluindo o efeito do carbono. Shida propôs um modelo mais complexo, levando em conta não só o efeito do carbono como também o da transformação de austenita a ferrita que ocorre se a deformação ocorre abaixo da temperatura Ar_3 . Este foi um avanço significativo, já que essa transformação provoca um amaciamento considerável no material. Esses três modelos foram refinados posteriormente por diversos autores de forma a incorporar o efeito dos demais elementos de liga presentes nos aços. Contudo, todos esses modelos falham ao não considerar a recristalização dinâmica que pode ocorrer na austenita caso for ultrapassado um valor crítico de

grau de deformação. Spittel procurou incorporar esse efeito numa equação empírica, mas esse fenômeno metalúrgico somente pôde ser incorporado consistentemente nos cálculos após o desenvolvimento dos modelos de evolução microestrutural [10]. Métodos matemáticos mais poderosos, como redes neurais [11] e interpolação multidimensional [12] oferecem maiores recursos para se englobar os efeitos dos elementos de liga e dos vários fenômenos metalúrgicos que podem afetar a resistência à deformação a quente.

Evolução Microestrutural da Austenita. A austenita que está sendo laminada a quente passa por diversos fenômenos de restauração microestrutural, os quais somente foram modelados matematicamente de forma satisfatória através de numerosos trabalhos desenvolvidos a partir da década de 1970 [13]. A definição quantitativa precisa das condições em que ocorrem os diversos mecanismos de restauração (recuperação e recristalização, estática ou dinâmica) e sua cinética permitiu calcular a evolução do tamanho de grão austenítico durante a laminação a quente, elevando substancialmente a precisão dos valores calculados de resistência à deformação a quente [14]. Aliás, este é um dos métodos mais práticos para se validar os modelos de evolução microestrutural, já que a extração e têmpera de amostras durante o processo industrial é extremamente difícil; além disso, a avaliação do tamanho de grão ferrítico final não permite aferir toda a evolução microestrutural ocorrida, já que ficou provado que diferentes evoluções microestruturais da austenita podem gerar valores muito próximos de tamanho de grão ferrítico final [9].

Resfriamento Forçado. O resfriamento forçado imposto à tira laminada deve ser controlado por um modelo matemático que calcula a vazão correta de água que deve ser usada para se atingir precisamente a temperatura de bobinamento. Em termos práticos esse modelo determina o número de bancos de resfriamento que devem ser ligados e a taxa de resfriamento a que o aço será submetido. Os pontos cruciais desse cálculo são uma caracterização precisa dos coeficientes de transferência de calor pelos jatos de água e, no caso de aços com médio e alto teor de carbono, da recalescência decorrente da transformação da austenita em ferrita e perlita. Essa liberação de calor aumenta significativamente com o carbono equivalente do aço, ou seja, com a fração de perlita formada na microestrutura final [15]; além disso, neste caso a decomposição da austenita ocorre num espaço de tempo menor, impondo maiores solicitações térmicas à mesa de resfriamento [16].

Transformação da Austenita e Propriedades Mecânicas. Uma decorrência natural dos modelos para cálculo da evolução microestrutural da austenita e da taxa de resfriamento do esboço na mesa de resfriamento foi o desenvolvimento de modelos para cálculo da microestrutura final obtida no produto e de suas correlações com as propriedades mecânicas finais. Esses últimos modelos somente se tornaram viáveis com os poderosos recursos computacionais surgidos a partir da década de 1990. Foram adotadas duas abordagens para este tipo de cálculo. A mais consagrada usa equações empíricas baseadas em parâmetros como a constante de Zener-Hollomon e energias de ativação para os processos metalúrgicos. Essa alternativa é bastante eficaz, mas tem o inconveniente de exigir a determinação de constantes empíricas para cada material processado pela linha. Outra possibilidade é o uso de métodos estatísticos avançados, tais como redes neurais ou modelos de processo gaussianos, para se deduzir as relações metalúrgicas fundamentais por “força bruta”, ou seja, de forma puramente matemática [13]. A Voest-Alpine alega que conseguiu ganhos financeiros subs-

tanciais com o uso desse tipo de modelo: 180.000 euros para uma produção de 900.000 t anuais de bobinas a quente em função da supressão de ensaios mecânicos e de mais 170.000 euros em função da redução do teor de Mn em determinados produtos que passaram a ser resfriados com uma estratégia mais adequada na saída do laminador. Além disso, eventuais flutuações no nível de encharque térmico das placas e na composição química do material passaram a ser compensadas por ajustes nas temperaturas de acabamento ou bobinamento, evitando desvios em potencial decorrentes de propriedades mecânicas inadequadas no produto [17,18].

- Adaptação dos Modelos Matemáticos às Condições Industriais

Por melhores que sejam, os modelos matemáticos embutidos no sistema de automação de um Laminador de Tiras a Quente jamais poderão por si só fornecer resultados suficientemente precisos, uma vez que sempre haverá fatores dos mais diversos que não serão levados em conta por eles. Além disso, os modelos usados no controle *on-line* de processos até hoje possuem um grau significativo de simplificação para que seu tempo de execução seja minimizado, fato que leva a imprecisões ainda maiores nos resultados calculados [4].

Uma das soluções para este problema consiste em “dividir para governar”: as constantes empíricas presentes nas diversas equações dos modelos deixam de ser válidas para todas as condições envolvidas. Seus valores passam a ser função de determinadas características do produto que está sendo laminado, tais como composição química, dimensões, tipo de cilindro de trabalho, etc. Esses valores, determinados durante a fase de ajuste do modelo para cada tipo de laminado considerado, são armazenados nas chamadas tabelas hierárquicas. Alguns dos modelos atualmente disponíveis substituíram tais tabelas por redes neurais que efetuam os cálculos dessas constantes a partir dos dados do laminado [19].

Os sistemas de automação dos Laminadores de Tiras a Quente também contam com o chamado controle dinâmico. Ou seja, à medida que a cabeça da tira vai sendo processada suas temperaturas e espessuras finais vão sendo registradas. Caso forem observados valores fora da faixa de variação objetivada, o sistema pode tomar ações corretivas e reajustar as várias cadeiras de laminação conforme necessário para retomar a faixa de dispersão objetivada no restante do material. Em função da rapidez com que esses reajustes são necessários eles são executados pelo Nível 1 do sistema de automação.

Após cada bobina a quente ter sido completamente processada, todos os dados reais são comparados com os respectivos valores que haviam sido previamente calculados pelos modelos matemáticos. São computados os erros correspondentes, cujos valores são usados para se recalcularem as chamadas constantes de aprendizado dos modelos. Esses erros são causados pelos diversos fatores que não são levados em conta pelos modelos, como por exemplo discrepâncias entre os valores reais e os informados ao modelo relativos às dimensões e composição química da placa; erros nos sensores da linha (*offset*, ruído aleatório, *drift*, etc.); erros inerentes aos modelos matemáticos; alterações imprevisíveis no equipamento do laminador causados por desgaste ou dilatação térmica; etc. Este tipo de ajuste é feito pelo Nível 2 do sistema de automação [4].

- O Futuro do Modelamento Matemático da Laminação

O Método dos Elementos Finitos é a ferramenta matemática mais poderosa disponível para o modelamento de eventos mecânicos, térmicos e microestruturais, fato que o torna particularmente adequado para aplicação na laminação a quente. Infelizmente ele padece dos mesmos problemas que afetam outras abordagens para o modelamento matemático deste processo, ou seja, inadequação dos dados de entrada, como a condição interfacial entre esboço e cilindro de trabalho, coeficientes de transferência de calor, etc. Portanto, não é de se surpreender que o foco dos trabalhos atuais sobre modelamento não se concentre nos métodos matemáticos em si, mas sim na morfologia da carepa formada e suas interações com o cilindro de trabalho. A aplicação do Método de Elementos Finitos ainda é restrita, pois ainda hoje o tempo necessário para a resolução dos problemas através dele é muito longo, especialmente nos casos em que se adota geometria tridimensional. Esse problema deverá se tornar cada vez menos crítico no futuro, à medida que os computadores vão se tornando cada vez mais potentes. Uma solução de compromisso, já possível atualmente, consiste em se resolver através desse método uma série de casos criteriosamente escolhidos para um dado problema e se usar os resultados obtidos para treinar uma rede neural. Essa rede, uma vez treinada, pode calcular rapidamente as soluções para casos não-previstos através da interpolação entre os resultados por ela absorvidos [8].

Outro campo muito promissor já nos dias de hoje é a análise extensiva de dados de processo. O enorme avanço na tecnologia de instrumentação e da informática viabilizou a aquisição, transmissão e armazenamento de enormes quantidades de dados. Passou-se então de uma situação de carência quase absoluta de dados a uma verdadeira *overdose* que, surpreendentemente, impõe sérias dificuldades para a extração de informações fidedignas a partir da informação massiva obtida [20].

Entre as ferramentas usadas para se extrair conhecimento a partir dessa enorme massa de informações estão os chamados métodos de mineração de dados (*data mining*), ou seja, um processo não-trivial de identificação de padrões nos dados que sejam válidos, novos, potencialmente úteis e, após análise exaustiva, compreensíveis [12]. Este método consiste na execução contínua do seguinte ciclo: definição da tarefa – seleção de dados – preparação de dados – visualização/estatística – descoberta/modelamento – interpretação/avaliação – realização [20].

Um método de Inteligência Artificial que é particularmente favorecido pela existência de grandes massas de dados são as redes neurais. Elas permitem modelar processos cuja representação matemática é muito difícil ou mesmo impossível, pois conseguem extrair automaticamente o conhecimento que está por trás de grandes massas de dados (ou seja, as múltiplas correlações não-lineares entre as variáveis) através de processos de aprendizado. Essa etapa de treinamento pode ser longa mas, uma vez treinada, a rede neural é executada rapidamente pois, a rigor, trata-se apenas de um polinômio de interpolação. Essa técnica já foi usada com sucesso para o modelamento de diversos processos ligados à laminação a quente [21].

- Conclusões

A associação de níveis crescentes de qualidade no produto, redução de custos operacionais e mais o progresso na área digital criou um círculo virtuoso que vem ala-

vancando o uso da automação na laminação de produtos planos de aço – e, em consequência, vem fomentando o desenvolvimento de modelos matemáticos cada vez mais precisos e rápidos, além da pesquisa básica em dados fundamentais para subsidiá-los. O calcanhar de Aquiles dessa evolução está no elemento humano, já que é necessário manter mão-de-obra continuamente atualizada tecnicamente para que possa utilizar os métodos matemáticos e recursos digitais da maneira mais útil possível para a operação industrial. O atendimento dessa necessidade é cada vez mais difícil numa era de usinas com quadros enxutos e custos crescentes decorrentes da contínua evolução dos computadores e programas computacionais. Uma possível solução estaria numa interação mais produtiva entre as usinas e a comunidade acadêmica metalúrgica.

- Referências Bibliográficas

1. GINZBURG, V.B. Basic Principles of Customized Computer Models for Cold and Hot Strip Mills. **Iron and Steel Engineer**, September 1985, p. 21-35.
2. PRICE, D.J. Product-led Developments in Process Technology. **Millennium Steel**, 2001, 28-34.
3. MELTON, K.N. The Deformation Models Needed by the Steel Industry. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, 357, 1999, 1531-1547.
4. REEVE, P.J. e outros. Control, Automation and the Hot Rolling of Steel. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, 357, 1999, 1549-1571.
5. GORNI, A.A. e outros. Comparação entre Abordagens para o Modelamento Matemático do Perfil Térmico de Placas durante seu Reaquecimento. **Revista Escola de Minas**, Julho-Setembro 2000, 203-209.
6. SOLIS, D. e outros. Results of Automatic Control of Slab Reheating Furnace Using a Numerical Model. In: 15th IAS Rolling Conference. **Proceedings...** San Nicolas, Argentina, November 2004, 591-600.
7. SELLARS, C.M. Computer Modelling of Hot Working Processes. **Materials Science and Technology**, 1:4, April 1985, 325-332.
8. BEYNON, J.H. Finite-Element Modelling of Thermomechanical Processing. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, 357, 1999, 1573-1587.
9. SELLARS, C.M. Modelling – An Interdisciplinary Activity. In: Mathematical Modelling of Hot Rolling of Steel. **Proceedings...** Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Hamilton, Aug. 1990, 1-18.
10. GORNI, A.A. Cálculos de Laminação. In: Laminação de Produtos Planos. **Curso**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, Outubro 2004.
11. GORNI, A.A. Modelling the Effect of Alloy Elements in the Hot Strength of Steel. In: International Conference on Engineering Applications of Neural Networks – EANN '97. **Proceedings...** Royal Institute of Technology, Stockholm, 1997, 143-150.

12. LENARD, J.G. e outros. **Mathematical and Physical Simulation of the Properties of Hot Rolled Products**. Elsevier Science, Oxford, 1999, 364 p.
13. SHERCLIFF, H.R. & LOVATT, A.M. Modelling of Microstructure Evolution in Hot Deformation. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, 357, 1999, 1621-1643.
14. GORNI, A.A. & VALLIM, P.S.S. Efeito da Recristalização Dinâmica na Resistência à Deformação de Aços Processados no Laminador de Tiras a Quente. In: 40º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos. **Anais...** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Vitória, Outubro 2003, 235-243.
15. PAN, Y.T. e outros. New Thermal Model for the Production of Medium C Hot Rolled Strips. **China Steel Technical Report**, 16, 2002, 1-8.
16. FRYER, C. e outros. Predictive Control of Temperature and Width for Hot Strip Mills. **Millennium Steel**, 2001, 283-287.
17. ANDORFER, J. e outros. Un Progrès Significatif: le Contrôle Métallurgique Total des Caractéristiques Mécaniques des Bandes Laminées à Chaud avec VAI-Q Strip. **Revue de Metallurgie-CIT**, Oct. 2000, 1197-1204.
18. RESCH, H. e outros. Slab- and Strip-Quality Control through In-Depth Metallurgical Modeling. Continuous Casting and Rolling 2004 – CCR '04. **Proceedings...** Voest-Alpine Industrieanlagebau, June 2004, Paper 5.4.
19. SCHREIBER, S. e outros. Automation and Process Models at the New Wuhan No. 2 Wide Hot Strip Mill. **MPT International**, 6/2004, 32-37.
20. PETERS, H. e outros. Optimisation of Flat Product Quality by Intelligent Data Exploitation. In: 3rd European Rolling Conference. **Proceedings...** Verein Deutscher Eisenhüttenleute – VDEh, Düsseldorf, June 2003, 317-322.
21. GORNI, A.A. Aplicação de Redes Neurais Artificiais no Modelamento de Processos da Laminação de Chapas Grossas. In: I Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais. **Proceedings...** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, Outubro 1994, vol. 6, 123-137.

MATEMATICAL MODELLING OF ROLLING: FROM SCIENCE FICTION TO A TOOL FOR INDUSTRIAL CAPACITATION ¹

Antonio Augusto Gorni ²

Abstract

Contrary to the common belief, the automation of the rolling processes is not justified by the eventual reduction of the manpower needed for production, but instead to assure rolled products with better dimensional accuracy and mechanical properties consistency, followed by reduction in the operational costs and those caused by scrapping and product quality degrading. The lowering costs of computational resources can be added to this list. This situation, coming since the 1980s, motivated the enormous progress in the development of mathematical models of rolling. Today the main limitations to the performance of such models is due to the lack of knowledge about specific metallurgical, thermal and interfacial aspects of the rolling process. The greater data availability is also requiring the use of complex mathematical and statistical tools to validate the information gathered and to extract real knowledge about the process. This skyrocketing technological sophistication represents one more heavy demand to be satisfied by the technical support teams of steel plants, which are already very small after the rationalization done towards an increased competitiveness. One of the possible solutions for this situation would be a more productive interaction with the metallurgical academic community.

Keywords: Rolling, Automation, Mathematical Modelling

¹ Keynote Paper to be presented at the 60th ABM Congress, Belo Horizonte (Brazil), July 25 to 28, 2005.

² ABM Member. Materials Engineer, M. Eng, Dr. Eng., Process Analyst of the Hot Rolling Technical Support Department, Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: gorni@cosipa.com.br