

MODELOS MATEMÁTICOS DA NOVA LINHA DE LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE DA GERDAU¹

Altair Lucio de Souza²
Emanuelle Garcia Reis³
José Herbert Dolabela da Silveira⁴
Mauricio Martins Pereira⁵

Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar os principais modelos matemáticos e pacotes tecnológicos da nova linha de Laminação de Tiras a Quente da Gerdau. As premissas empresariais de oferecimento ao mercado de um produto de alta competitividade levaram a Gerdau a investir em equipamentos de tecnologia avançada e comprovada, que garante elevada qualidade ao produto, baixo custo de produção e alta produtividade. Essa linha tem uma das mais modernas tecnologias de sistemas de automação com modelos matemáticos de alta performance para um laminador a quente. Os principais modelos matemáticos que serão descritos neste trabalho são: cálculo do esquema de passes com múltiplos *setups* ao longo do comprimento da tira, esquema de passes com otimização durante a laminação, controle dinâmico de perfil, controle de forma, *smart crown*, controle de deslocamento de cilindros (*shifting*), flexão dos cilindros (*bending*), controle de resfriamento diferenciado ao longo do comprimento da mesa dos cilindros de trabalho e modelo de resfriamento com previsão de transformação de fases no sistema laminar.

Palavras-chave: Modelo matemático; Laminador de tiras a quente.

MATHEMATICAL MODELS OF GERDAU NEW HOT STRIP MILL

Abstract

This paper intends to present the main mathematical models and packages of the Gerdau new Hot Strip Mill. The business premises to offer to the market a product of high competitiveness have led to Gerdau to invest in equipments of high and proved technology, which guarantee high quality to the final product, low production cost and high productivity. This line is one of the most modern technologies of automation systems with mathematical models of high performance for a hot strip mill. The main mathematical models which are described in this work are: calculation of pass schedule with multiple *setups* along the strip length, pass schedule with optimization during rolling, dynamic profile control, shape control, *smart crown*, work roll shifting, work roll *bending*, dynamic work roll cooling along the table length and laminar cooling model with predictive phase transformation.

Key words: Mathematical model; Hot strip mill.

¹ Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, M.Sc., CQE/ASQ, Assessor Técnico das Laminações, Gerdau Ouro Branco, MG, Brasil.

³ Engenheira Civil, Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela UFMG, Assessor Técnico das Laminações, Gerdau Ouro Branco, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Gerente da Laminação de Chapas Grossas, Gerdau Ouro Branco, Membro da ABM, MG, Brasil.

⁵ Engenheiro Metalurgista, MBA, Chefe de Operação da Linha de Laminação de Tiras a Quente, Sócio da ABM, Gerdau Ouro Branco, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O Laminador de Tiras a Quente da GERDAU é uma concepção compacta, com capacidade nominal de 823.000 t/ ano de BQ's nas espessuras de 2,0 a 20,0 mm e larguras de 900 a 2.100mm.

A Figura 1 mostra um desenho esquemático da linha, composta de um forno de aquecimento (a), um laminador do tipo Steckel (b), uma mesa de resfriamento do tipo "laminar flow" (c) e uma bobinadeira hidráulica (d). O plano de implantação dessa nova linha é composto, também, por uma linha de acabamento e encruamento de bobinas. Na segunda fase de implantação da linha serão instalados mais um forno de aquecimento, um laminador desbastador com Edger, mais três cadeiras acabadoras e mais uma bobinadeira.

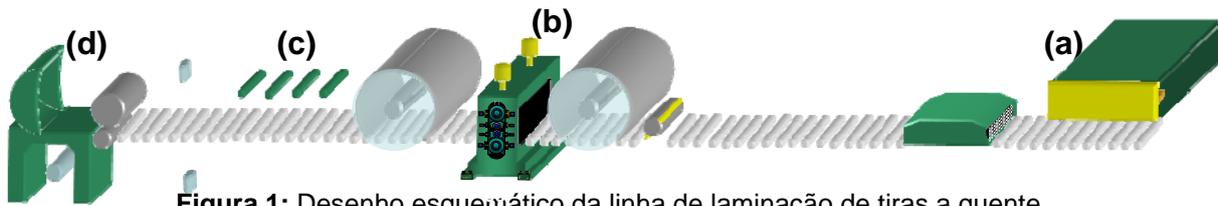


Figura 1: Desenho esquemático da linha de laminação de tiras a quente.

O laminador possui uma das mais recentes tecnologias para controle de temperatura, dimensão, forma e qualidade superficial das tiras, tais como: cálculo do esquema de passes com múltiplos *setups* ao longo do comprimento da tira, esquema de passes com otimização durante a laminação, controle dinâmico de perfil, controle de forma, *smart crown*, controle de deslocamento de cilindros (*shifting*), flexão dos cilindros (*bending*), controle de resfriamento diferenciado ao longo do comprimento da mesa dos cilindros de trabalho e modelo de resfriamento com previsão de transformação de fases no sistema laminar.

Com relação ao controle de qualidade de superfície, foi instalado um sistema de inspeção *on-line* para face superior e inferior, no final da mesa de resfriamento, que garante a inspeção de 100% das tiras laminadas.

Com relação ao controle de dimensão e temperatura, foi instalado um sistema de medição *on-line* de temperatura, perfil, espessura e largura, em praticamente todos os passes garantindo assim um controle *on-line* das dimensões e propriedades mecânicas da tira.⁽¹⁾

2 DESENVOLVIMENTO

O foco desse trabalho são os modelos matemáticos de nível 2 (ambiente de automação) com indicação de algumas interações com o nível 1 (ambiente de controle elétrico). Serão abordados os principais tópicos relacionados ao modelo de *setup*, controles dinâmicos de temperatura, de planicidade e coroamento para a obtenção do produto acabado conforme especificação desejada.

O sistema de controle da linha apresenta funções tecnológicas que são totalmente integradas através do sistema de automação.^(2,3) Isto inclui o planejamento e controle de produção, modelos matemáticos e controle do processo, equipamentos elétricos básicos (medidores *on-line* e motores), conforme Tabela 1.

Tabela 1. Integração do sistema de automação

Nível de Automação	Descrição
Nível 3 Controle da Produção	<ul style="list-style-type: none"> - Planejamento da Produção, - Sequenciamento de Produção, - Controle de Estoque.
Nível 2 Otimização de Processo	<ul style="list-style-type: none"> - Modelos Matemáticos: <ul style="list-style-type: none"> - Cálculo do Esquema de Passes, - Múltiplos <i>Setups</i> do laminador (Modelo de <i>taper</i>), - Temperatura ao longo do processo, - Previsão de força de laminação utilizando redes neurais, - Estratégia de perfil e planicidade, - <i>Tracking</i> do material, - Resfriamento no Sistema laminar considerando a transformação de fases e microestrutura. - Controle do Ritmo de Processo: <i>Mill Pacing</i>. - Adaptações automáticas.
Nível 1 Automação Básica: - Sequenciamento, bloqueios (<i>interlocks</i>), etc.	<ul style="list-style-type: none"> - Controle automático de espessura: AGC – <i>Automatic Gauge Control</i>, - Controle automático de perfil: DPC – <i>Dynamic Profile Control</i>.
Nível 0 Equipamento Elétrico Básico	<ul style="list-style-type: none"> - Motores, - Sensores, - Medidores.

A Tabela 2 descreve as etapas dos cálculos que são realizados nos modelos matemáticos da linha e a Figura 2 mostra o fluxograma esquemático da seqüência dos cálculos. É importante ressaltar que os cálculos são atualizados em função do intervalo de tempo e corrigidos no momento que são efetuadas medições (força de laminação, espessura e temperatura da tira, etc.).⁽¹⁾

Tabela 2: Cálculos realizados pelo modelo matemático do laminador

Etapas	Descrição
precalc (<i>setup do laminador</i>)	O objetivo do “ precalc ” é determinar a escala de passes completa. Ele inicia na frente do descarepador utilizando a temperatura de desenformamento. Este cálculo é realizado novamente utilizando a temperatura real da placa na entrada do laminador.
postcalc	O objetivo do “ postcalc ” é adaptar os coeficientes do modelo às condições reais (força de laminação, torque, gap, força de <i>bending</i> , etc.) para o passe sucessivo. Essa adaptação é realizada após cada passe comparando os resultados reais versus os resultados calculados.
recalc	O objetivo do “ recalc ” é executar um novo cálculo dos passes restantes, baseado nos resultados obtidos no ‘ postcalc ’. O ‘ recalc ’ considera nos cálculos a correção de temperatura em função de atrasos no processo e/ ou mudanças no ‘input’ realizadas pelo operador.
adapt	O objetivo do “ adapt ” é adaptar todos os modelos para a próxima placa. Essa adaptação não é realizada passe a passe, mas sim placa a placa.

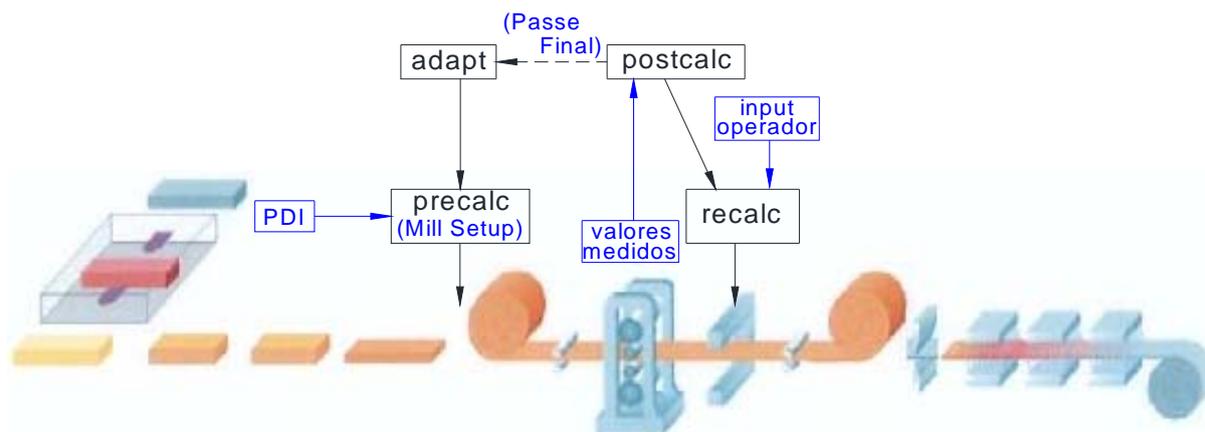


Figura 2: Fluxograma esquemático da sequência dos cálculos realizados no laminador.

2.1 Cálculo do Esquema de Passes

O modelo de esquema de passes determina a máxima redução possível em cada passe seguindo as limitações do laminador (ângulo máximo de mordida, redução máxima por passe, valor máximo da força de laminação e torque) e as restrições de processo (temperatura de laminação, dimensional e planicidade da tira), se nenhum limite é excedido, o passe é finalizado. Esse cálculo se repete até atingir a espessura de acabamento, e assim se obtém todos os passes desde a espessura da placa até a espessura final da tira.

O esquema de passes completo é gerado automaticamente antes de iniciar a laminação. Durante a laminação o esquema de passes é atualizado a cada passe executado baseado nas dimensões e temperatura do material, assegurando que o produto final esteja de acordo com a especificação.

O modelo de esquema de passes interage com os demais modelos da linha de laminação (força, torque, *bending*, temperatura, velocidade) fornecendo os seguintes valores de referência para cada passe: posição da abertura de cilindros (GAP), velocidades de laminação, força de laminação e *bending*, posição do *shifting*, torque, dimensões nominais da tira, quantidade de água de refrigeração dos cilindros de trabalho, e ganhos dos controles dinâmicos (AGC – *Automatic Gauge Control*, DPC – *Dynamic Profile Control*). A Tabela 3 apresenta um exemplo de uma escala de passe de laminação de uma redução de espessura de 220 mm a 16 mm.

Tabela 3: Exemplo de esquema de passes realizado pelo modelo matemático

Passo	Espessura [mm]	Redução [%]	Força [MN]	Torque [MNm]	Velocidade [m/s]	Posição do <i>Shifitting</i> [mm]
-	220	-	-	-	-	-
1	182,1	17	8,8	628	2,5	-150
2	144,2	21	9,5	644	3,0	-150
3	106,3	26	10,5	671	4,0	-150
4	68,3	36	12,3	728	4,0	-150
5	45,0	34	11,1	490	4,5	-130
6	30,1	33	10,2	348	5,0	-120
7	16,0	47	14,1	419	5,0	-100

2.2 Múltiplos Setups e Função Taper

O modelo calcula, para cada passe, múltiplos *setups* pelo nível 2 que são transmitidos para o nível 1 que efetua a interpolação desses dados em função do comprimento do laminado. No total são calculados vinte *set-points* (Figura 3), isto inclui referências para as velocidades (laminador e mesas de rolos) e controles dinâmicos (AGC e DPC).

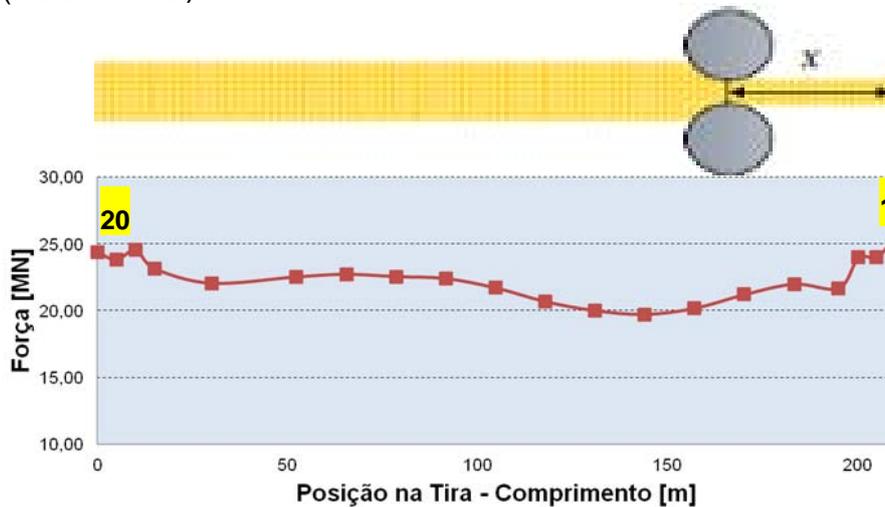


Figura 3. Exemplo de um múltiplo *setup* ao longo do comprimento da tira.

A vantagem de se ter esses múltiplos *setups* é poder compensar a variação de resistência do laminado em função da variação de temperatura ao longo do comprimento da tira obtendo assim espessuras mais homogêneas entre as extremidades e o corpo da tira e obter um perfil de espessura variável que será aplicado na função *taper*, conforme Figura 4.

O modelo de *Taper* faz parte do modelo de escala de passes no nível 2 do sistema de controle, e é realizado em *setups* de múltiplos pontos ao longo da tira. A temperatura nas pontas decresce fortemente em função da redução de velocidade para finalizar ou iniciar o passe na fase de acabamento. Logo a força de laminação e espessura da tira são maiores nas pontas. O *taper* minimiza as diferenças de espessura nas pontas e, como conseqüência, ocorre uma leve redução da força de laminação nas mesmas para os próximos passes. A Figura 4a indica uma criação do *taper* com o aumento da redução na cauda do material, a Figura 4b mostra o perfil do material com *taper* na cauda e a Figura 4c indica a remoção do *taper* com uma redução menor nessa região.

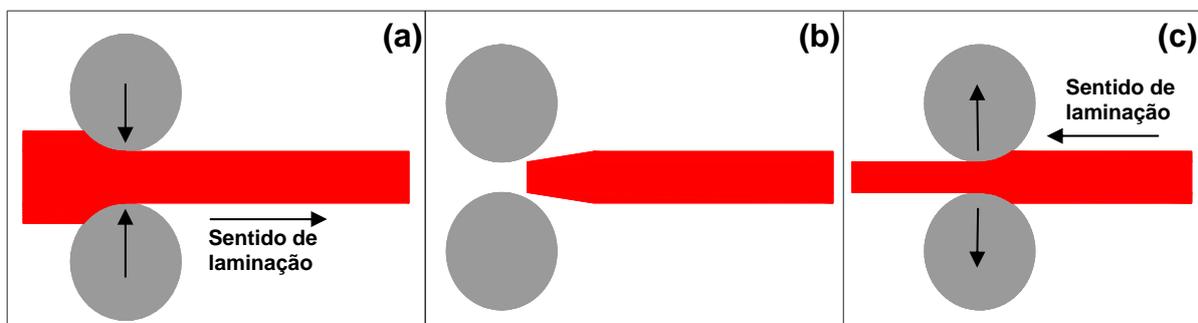


Figura 4. Desenho esquemático da função *Taper*.

Mesmo com a utilização do taper a força nas pontas continua mais elevada do que no corpo da tira devido a menor temperatura, porém esta diferença é bem menor quando não se utiliza esta função. Essa redução de força gera uma maior estabilidade no processo e melhoria da forma da tira.

2.3 Sistema de Controle do Perfil e Planicidade (PFC)

O sistema de controle do perfil e planicidade (PFC – *Profile and Flatness Control*) da tira laminada a quente visa garantir os limites especificados de coroamento e planicidade da tira. O controle do PFC é executado através dos seguintes atuadores: Sistema de WRB (*Work Roll Bending*), sistema de WRS (*Work Roll Shifting*), *Smart crown*, sistema de ajuste de coroamento térmico dos cilindros e distribuição de carga nos passes de laminação (esquema de passes). As funcionalidades do PFC estão subdivididas entre os sistemas de controle do nível 1 (DPC - *Dynamic Profile Control*) e do nível 2 (modelo de *bending*). O controle de nível 2 executa os cálculos dos *set points* e envia para o grupo de atuadores (*setup* e ganhos) para o sistema de controle do nível 1. A tarefa do nível 1 é receber e implementar os *set points* determinados pelo nível 2 e retornar os dados medidos para o nível 2 com o propósito de adaptação.

Nos laminadores tipo 4HI, as forças de laminação resultam na flexão dos cilindros de encosto (BUR's) e dos cilindros de trabalho (WR's), achatamento dos WR's, e outros fenômenos durante a laminação. Isto promove irregularidades na espessura e problemas de forma do material laminado. Para contornar esta situação o laminador apresenta um dispositivo que tem a finalidade de produzir uma flexão variável de deformação elástica ao longo da mesa do cilindro de trabalho de tal modo que o perfil do GAP, e conseqüentemente o perfil da tira seja alterado. Isso é realizado pela aplicação de forças nas extremidades dos cilindros através de um mecanismo hidráulico denominado *Bending*^(3,4) (Figura 5). O monitoramento desta força é realizado por transdutores de pressão instalados nos mancais dos cilindros de trabalho e um controle dinâmico é feito pela comparação da força aplicada (obtida nos transdutores) com a força de referência (obtida pelo modelo) retornando um adequado ajuste de pressão ao circuito hidráulico do *Bending*.

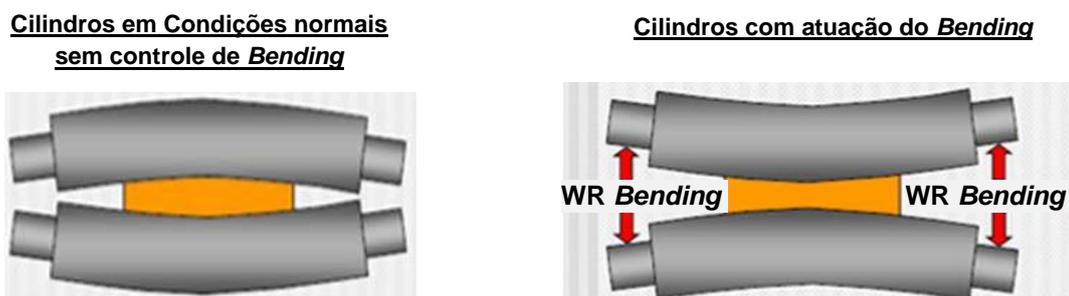


Figura 5. Desenho esquemático do funcionamento do *Bending*.

A interface entre o cilindro de trabalho e a tira é uma região crítica para o controle do perfil e planicidade. Para um cálculo preciso da deformação elástica nesta interface de contato, os seguintes dados dos cilindros devem ser conhecidos: geometria, tipo, perfil de usinagem, coroamento térmico, coroamento de desgaste, dureza e módulo de Young. Além dos dados dos cilindros, o modelo de *bending* também leva em consideração os seguintes dados de entrada: força de laminação, distribuição de

força transversal no ângulo de mordida e posição do *shifting*. A distribuição de carga é decisiva para o perfil e planicidade da tira, logo o modelo de *bending* interage com o modelo de escala de passes resultando no *setup* de força de bending para cada passe.

A Figura 6 mostra uma medição da força de laminação através da célula de carga e uma medição da força de bending através do transdutor de pressão. Uma variação da força de laminação e/ou da força de bending (ΔF - F_b) gera uma variação no perfil da tira. Caso ocorra essa variação o sistema será corrigido através do controle dinâmico (DPC) utilizando o atuador hidráulico (controle de pressão hidráulica) para melhorar o perfil da tira.

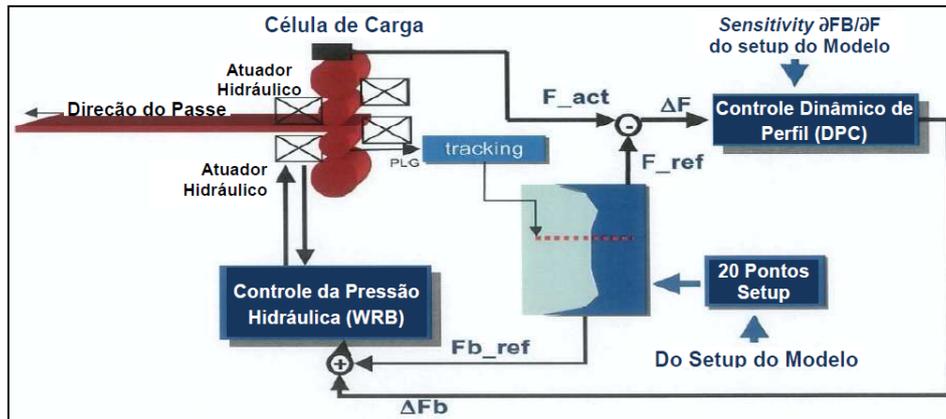


Figura 6. Desenho esquemático do funcionamento do Bending.

O *Smart crown* consiste na utilização de cilindros especiais que possuem perfil em formato senoidal. O controle de perfil de GAP se dá pelo deslocamento dos cilindros em direções axiais (coroamento positivo, negativo ou neutro) onde chamamos de *WRS (Work Roll Shifting)*. Isto permite um amplo range de adaptação do GAP para vários perfis e larguras da tira. A Figura 7 mostra o princípio básico do perfil dos cilindros e do posicionamento do shifting. O *WRS* com o *smart crown*⁽³⁾ são utilizados para compensar o desgaste localizado e coroamento térmico dos cilindros de trabalho para prevenir irregularidades no perfil transversal do laminado e conseqüentemente aumento de produção da campanha.

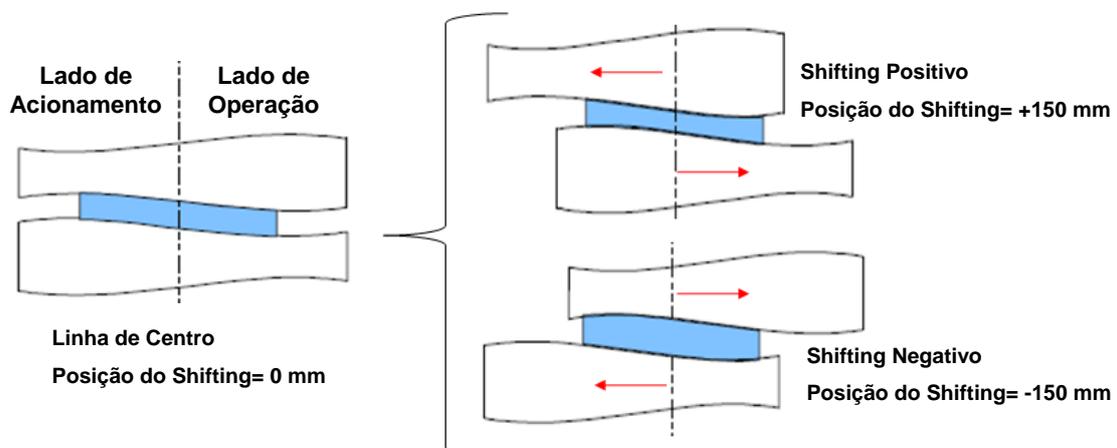


Figura 7. Exemplo do princípio básico do perfil e do posicionamento do shifting dos cilindros.

2.4 Modelo de Força e Torque de Laminação

A carga de laminação certamente é o parâmetro quantitativo mais importante deste processo de conformação, já que afeta os seguintes parâmetros: solicitações mecânicas das cadeiras e seus componentes, potência e torque dos motores de acionamento, precisão dimensional e planicidade da tira. A Figura 8 mostra os dados que alimentam o modelo de Força e Torque e os modelos que dependem desse resultado. Esse modelo é alimentado por um modelo de tensão de escoamento que é ajustado através de uma rede neural e leva em consideração a composição química, a temperatura, a deformação e a taxa de deformação do material.

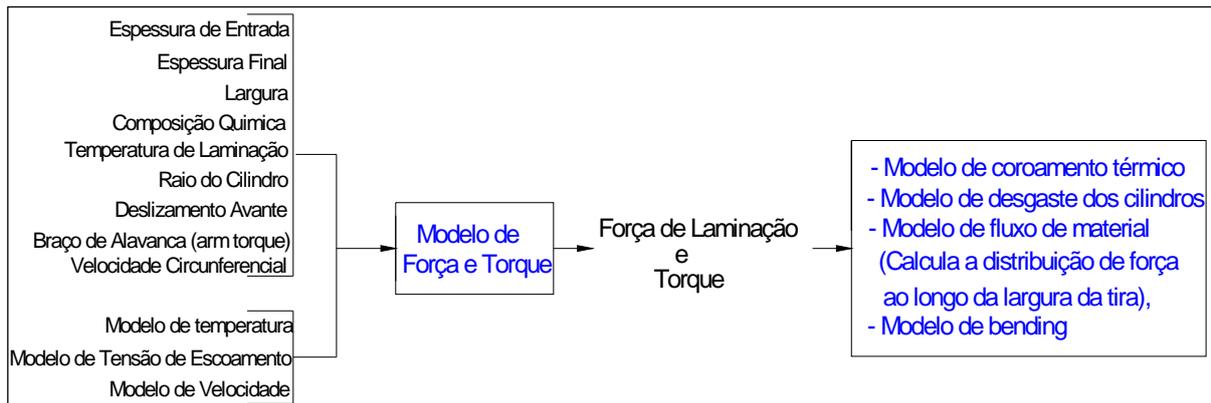


Figura 8: Dados que alimentam o modelo de Força e Torque e os modelos que dependem desse resultado.

2.5 Sistema Laminar: Controle de Resfriamento da Tira

O sistema laminar (Figura 9) é o elemento final de controle para ajuste das propriedades do aço. O controle da taxa de resfriamento da tira é fundamental para garantir as características microestruturas e propriedades mecânicas do produto através do resfriamento controlado e da temperatura de bobinamento. O processo de resfriamento da tira utiliza água, como meio refrigerante, através de vários jatos, superiores e inferiores, distribuídos ao longo da mesa entre o laminador e a bobinadeira final, subdivididos por trinta e duas sessões. Em cada sessão têm-se um header superior e três inferiores, estes também com válvulas de controle independentes.

O modelo de resfriamento do sistema laminar é resultado da interação de três submodelos, e são eles: modelo de temperatura, modelo de transferência de calor e modelo de transformação de fases.^(1,5) O modelo é capaz de realizar os cálculos em tempo real considerando rapidamente as interações dos diferentes efeitos, tais como flutuações na velocidade, temperatura final de laminação, vazão e temperatura da água.

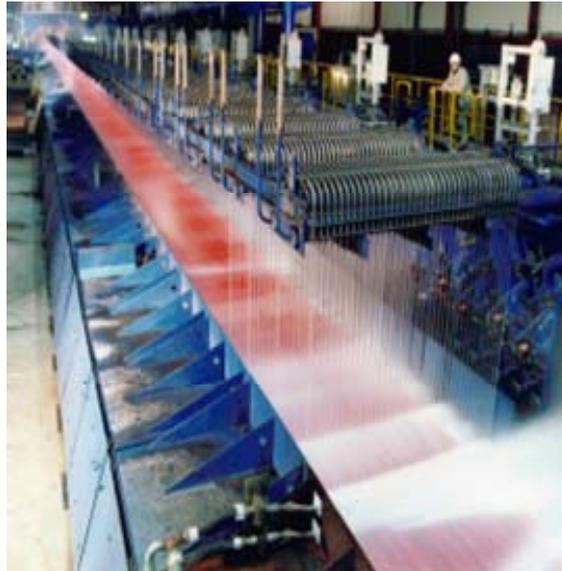


Figura 9: Exemplo de um sistema laminar.

O modelo de Temperatura é o responsável por calcular os fluxos de calor dentro da tira usando o balanço de energia, a distribuição de entalpia e a distribuição de temperatura. Este modelo corresponde à condução de calor ao longo da espessura da tira (Figura 10), sendo dividido por camadas. Quanto mais próximo da superfície maior o número de camadas e menor o espaçamento entre elas, pois a variação de temperatura é maior nessa região.

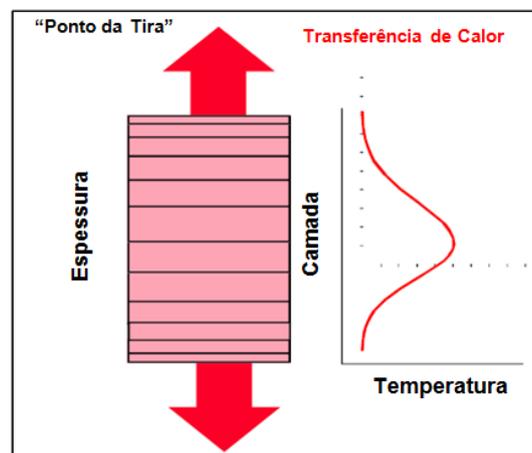


Figura 10: Distribuição de temperatura ao longo da espessura da tira.

O modelo de Transferência de Calor é o responsável por calcular o fluxo de calor na superfície da tira, dependendo das condições do ambiente, por exemplo, válvulas ligadas, temperatura da água, etc. Os principais mecanismos de perda de calor são:

- resfriamento com água por convecção forçada nas zonas de impacto dos sprays;
- convecção forçada em zonas de fluxo paralelo onde a água é separada da tira a quente por um filme de vapor;
- resfriamento ao ar;
- transferência de calor através das mesas de rolos;
- transferência de calor por radiação para o meio ambiente.

Estes mecanismos são modelados com bastante precisão e estão ilustrados na Figura 11.

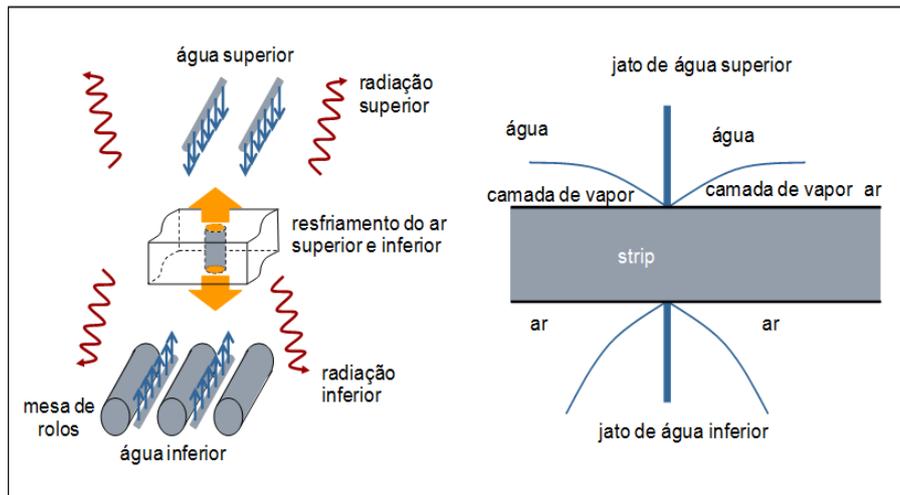


Figura 11: Exemplo de fatores que influenciam na perda de calor.

O modelo de Transformação de Fases é considerado o centro do modelo de resfriamento e é responsável pelo cálculo das frações de cada fase (ferrita, austenita, perlita e cementita). Conhecer esse processo é crucial devido as seguintes razões:

- a temperatura da tira é influenciada pela composição química do aço;
- com a transformação de fases as propriedades térmicas do material são alteradas; e
- o processo de transformação de fases tem uma grande influência na microestrutura e conseqüentemente nas propriedades mecânicas do material.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse projeto marca a entrada do grupo Gerdau na linha de aços planos. Foi feito um alto plano de investimentos visando produtividade, qualidade dos materiais laminados e permitindo a produção e desenvolvimento de uma gama extensa de diversos tipos de aço. Essa linha apresenta um alto grau de automação com novas tecnologias implantadas, objetivando minimizar as perdas no processo e a geração de defeitos. As novas exigências do mercado, para características dimensionais e propriedades mecânicas, serão amplamente atendidas.

Agradecimentos

A todos os envolvidos que atuam e atuaram de forma direta ou indireta no desenvolvimento deste projeto de altíssima complexidade, contribuindo para a construção deste marco na história da Gerdau.

REFERÊNCIAS

- 1 SIEMENS VAI. Technical Specification for Steckel Mill Plant for GERDAU Ouro Branco. 2010
- 2 PICHLER, R.; BRAMMER, M.; FARNIK, A. VAI Plate Mill Automation – The Leading Plate Mill Quality Improvement Package. *Metal* **2003**, mai. 2003.
- 3 SIEMENS VAI. SIROLL Solution for Hot Strip Mills. *Metals Technologies*, pp. 13-31, 2009.
- 4 WILMS, W.; STAHL, T. Profile and Flatness Control in Hot Strip Mills. *Metallurgical Plant and Technology*, pp. 74-90, jun.1985.
- 5 WEINZIERL, K.; LOFFLER, H. Unified Temperature Control. *Metals & Mining*, pp. 76-79, 2011.