

CONCEITOS GERAIS DOS MODELOS DE CONTROLE DOS LAMINADORES DA LINHA DE TIRAS A QUENTE 2¹

*Pedro Segundo da Silva Vallim²
Marcelo Magalhães Pereira³
Neilson Duarte de Souza⁴
Ricardo de Faria Machado⁴
Bruno Serafim Parra⁵*

Resumo

Este trabalho fornece uma descrição básica dos modelos de controle de operação dos laminadores de Bordas 2 (E2), Desbastador 2 (R2) e de Tiras a Quente 2 (LTQ2) da planta da Usiminas Cubatão. O foco são os modelos de controle de nível-2, ou de automação, apontando ainda algumas interações com o nível-1. São abordados principais tópicos conceituais dos controles de *set-up*, de largura e temperatura, de planicidade e coroamento. Dentro deste escopo, são dadas descrições comuns e específicas, por equipamento, e expectativas com a adoção desses modelos de controle na nova Linha de Tiras a Quente.

Palavras-chave: Laminador de tiras a quente; Modelos matemáticos; Controles de laminadores.

GENERAL CONCEPTS OF THE CONTROL MODELS OF THE MILLS OF THE HOT STRIP MILL LINE 2

Abstract

This paper provides a basic description of the control models of operation of the rolling mills Edger 2 (E2), Roughing (R2) and Hot Strip Mill 2 (HSM2) of the Usiminas Cubatão plant. The focus is the control models of level-2, of the automation, also pointing some interactions with level-1. Main conceptual topics are discussed about controls of the set-up, width and temperature, flatness and crown. Within this scope, are given common and specific descriptions, by equipment, and expectations with the adoption of these models of control in the new Hot Strip Line.

Key words: Hot strip mill; Mathematical models; Controls of mills.

¹ Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP.

² Membro da ABM. Engenheiro Mecânico, MBA em Siderurgia, CQE, Especialista em Laminação a Quente da Usiminas-Cubatão, Cubatão SP, Brasil. E-Mail: pedro.vallim@usiminas.com.

³ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, Gerente da Linha de Tiras a Quente 2 da Usiminas-Cubatão, Cubatão SP, Brazil. E-Mail: marcelo.magalhaes@usiminas.com.

⁴ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Produção da Linha de Tiras a Quente 2 da Usiminas-Cubatão, Cubatão SP, Brazil. E-Mail: neilson.souza@usiminas.com; ricardo.machado@usiminas.com.

⁵ Membro da ABM. Engenheiro de Materiais, MSC, Engenheiro de Produção da Linha de Tiras a Quente 2 da Usiminas-Cubatão, Cubatão SP, Brazil. E-Mail: bruno.parra@usiminas.com.

1 INTRODUÇÃO

A melhoria do controle em laminadores de linhas de tiras a quente sempre motivaram grandes esforços dos fornecedores e operadores desses equipamentos na direção da maior produtividade e rendimento do processo com melhor qualidade dos produtos, que no caso específico deste trabalho são tiras laminadas a quente, em forma de bobinas.

Justamente para atender às exigências atuais de produtividade e rendimento de processo, qualidade e variedade de produtos, está em fase final a montagem a nova Linha de Tiras a Quente 2, de configuração clássica, porém totalmente moderna, no estado da arte, levando para um alto patamar de desempenho e competitividade a missão de fornecimento de bobinas a quente. A Figura 1 mostra o fluxo de equipamentos dessa linha, indicando forno de reaquecimento, laminadores, bobinadeiras e equipamentos previstos em na primeira fase de operação. Outras duas fases de expansão disponibilizarão futuramente equipamentos adicionais como mais dois fornos, novos laminadores de bordas e de desbaste, cadeira F7 no laminador de tiras quente, entre outros.

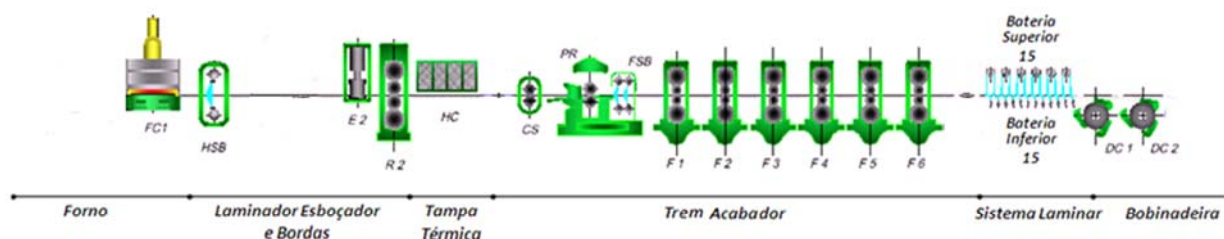


Figura 1 - Equipamentos da Linha de Tiras a Quente 2, na fase 1 de operação.

Entre os vários e complexos itens e sistemas envolvidos na implantação e operação desta nova linha, está o dos modelos matemáticos de controle dos laminadores Desbastador Reversível R2 (Horizontal R2 - *Rougher Mill 2*); de Bordas E2 (Vertical E2 - *Edger Mill 2*) e Contínuo de Tiras a Quente (LTQ2 - *Hot Strip Mill 2*).

O objetivo deste trabalho é descrever de forma básica e conceitual os modelos de controle de operação dos laminadores da nova Linha de Tiras a Quente 2 da Usiminas Cubatão, visando prover uma referência inicial para o seu entendimento.

O foco são os modelos matemáticos de nível-2, do ambiente de automação, com indicação de algumas interações com o nível-1, do ambiente de controle elétrico. Isto através da abordagem dos seus principais tópicos relacionados aos controles de *set-up* ou ajustes para obtenção da espessura, controles de largura e temperatura, de planicidade e coroamento. Não contempla assim modelos dinâmicos “puros”, de nível-1, como os de controle automático de espessura (AGC – *Automatic Gage Control*) e suas funções, controles de tensão dos *loopers* (rolos tensores) entre cadeiras e outros de mesmo tipo.

2 DESCRIÇÃO COMUM AOS MODELOS DE CONTROLE

A Tabela 1 mostra uma lista resumida dos macro-modelos matemáticos⁽³⁾ previstos para o controle da dos laminadores da Linha de Tiras a Quente 2.

A execução dos programas dos modelos, realizada pelos computadores de processo, ocorre em instantes específicos que correspondem à passagem da placa, esboço ou tira por uma ou mais etapas de seu processamento ao longo da linha. Assim a cada chamado curso de execução de cálculo do modelo, são cumpridos

objetivos de definições de *set-up*, geração de dados para suporte à execução de cursos de outros modelos, simulações ou simples geração de relatórios. Além disso, um curso repete ou pode repetir internamente vários ciclos de cálculo, quantos forem necessários para cobrir um determinado evento. Um exemplo típico é o que ocorre nos eventos de oscilação do material em espera na entrada de um dos laminadores.

Tabela 1. Modelos de controle de operação de nível-2 dos laminadores da linha de tiras a quente 2

Ítem	Denominação
Modelo de <i>Set-Up</i> dos Laminadores de Bordas E2 e Desbastador R2	RSU (<i>Roughing Mill Set-Up Control</i>)
Modelo Dinâmico de Controle de Largura	AWC (<i>Automatic Width Control</i>)
Modelo de Transferência do Esboço para o LTQ2	HTT (<i>Hold Transfer Table Control</i>)
Modelo de <i>Set-Up</i> do Laminador de Tiras a Quente 2 (LTQ2)	FSU (<i>Finishing Mill Set-Up Control</i>)
Modelo Dinâmico de Controle da Temperatura de Acabamento da Tira	FDTC (<i>Finishing Delivery Temperature Control</i>)
Modelo de Perfil dos cilindros do R2	RROP (<i>Roughing Roll Profile</i>)
Modelo de Perfil dos cilindros do LTQ2	FROP (<i>Finishing Roll Profile</i>)
Modelos de <i>Set-Up</i> e Controle Dinâmico do Coroamento e Planicidade da Tira, dos Sistemas de <i>Bender</i> , <i>Pair-Cross</i> e <i>Shift Roll</i>	APFC (<i>Automatic Profile and Flatness Control</i>)

A Figura 2 mostra um mapa detalhado dos cursos de execução dos modelos mencionados na Tabela 1, com setas destacando os do modelo FSUC, de cálculo da previsão do *set-up* do LTQ2, que pode ser limitadamente entendido como sendo o conjunto de informações da abertura (*gap*) e velocidade de cilindros de cada cadeira, necessários para a laminação da tira, facilitando desta forma o entendimento de sua definição, na realidade bem mais ampla e abrangente.

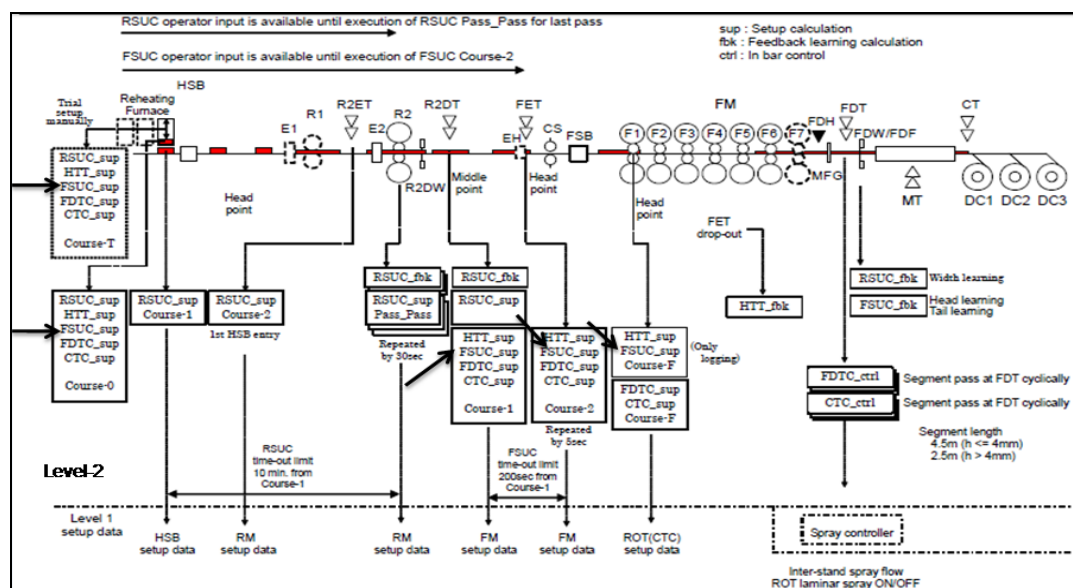


Figura 2. Cursos de execução dos modelos de controle de operação, ao longo das etapas de processo, com setas destacando os cinco cursos do FSUC.

Outro conceito comum a todos os modelos é a forma de tratamento dada ao armazenamento, feito em tabelas internas, de parâmetros das equações e características físico-químicas do material laminado, e mesmo características de dispositivos e componentes dos laminadores. Com acesso através de chaves ou discriminantes que identificam famílias de materiais laminados similares, ou SGF (*Steel Grade Family*), classes de espessuras e classes de largura. Porém sistemas tão vastos e complexos acabam demandando, dependendo do item, classes adicionais e específicas, como faixas de temperatura, quantidade de redução, cadeira ou passe, tipos de cilindros, entre outras. Desta forma, longe de ser um conceito hermético e limitado, a definição desses discriminantes hierárquicos, ou hierarquia, é variada para permitir acessos ao conteúdo de tabelas com estruturas customizadas para cada tipo de item ou constante das equações de cálculo matemático, bem como valores de aprendizado de variáveis com adaptação prevista.

3 MODELOS DO PROCESSO DE DESBASTE DO R2 E E2

O desbaste ou esboçamento é um processo de laminação com redução da espessura da placa, até a espessura de esboço, realizado pelo Laminador Desbastador R2. Inclui também a definição da largura do esboço a partir da largura da placa que sofrerá aumento, chamado alargamento, ou redução, sendo esse um controle da laminação vertical realizada pelo Laminador de Bordas E2.

Além da abertura, ou *gap*, e da velocidade de cilindros em cada passe e do número total de passes, outros parâmetros definidos pelo programa do modelo de controle^(4,5), por hierarquia são: posicionamento de guardas (abertura; *short-strokes* e outros), balanço de velocidades de cilindros de trabalho superior/inferior (*speed & load balance*), esquema de descamação para remoção de óxido de ferro (carepa superficial da placa e esboço), temperaturas de desenformamento visada e real calculada, entre outros. A Figura 3 dá uma visão básica dos macro-modelos de controle do processo de desbaste.

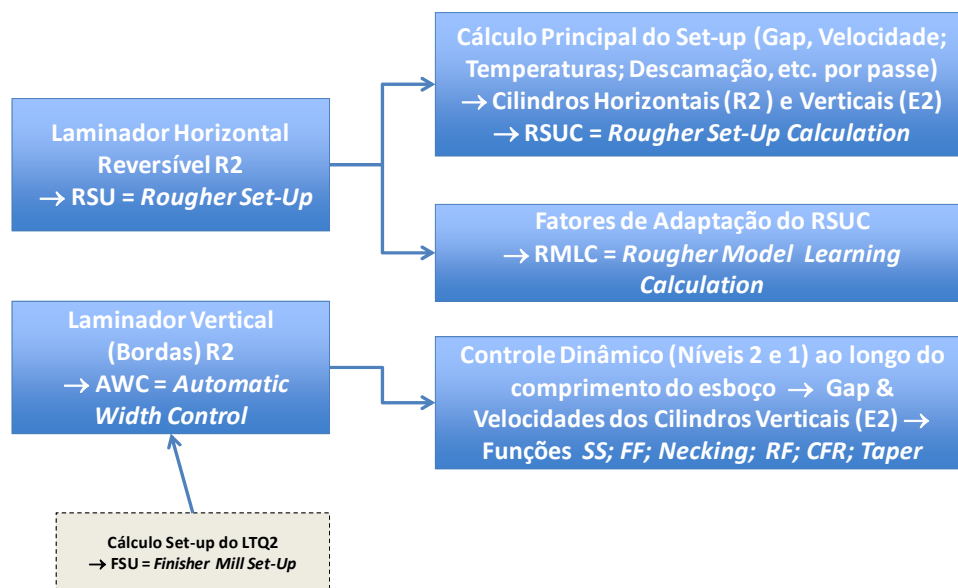


Figura 3. Macro-modelos de controle do processo de laminação de desbaste.

Embora RSUC, modelo principal do cálculo do *set-up* do desbastador R2 parta de uma abordagem convencional, variantes internas de metodologia de cálculo permitem uma maior confiabilidade de resultado, embora ao custo de uma maior complexidade das equações.

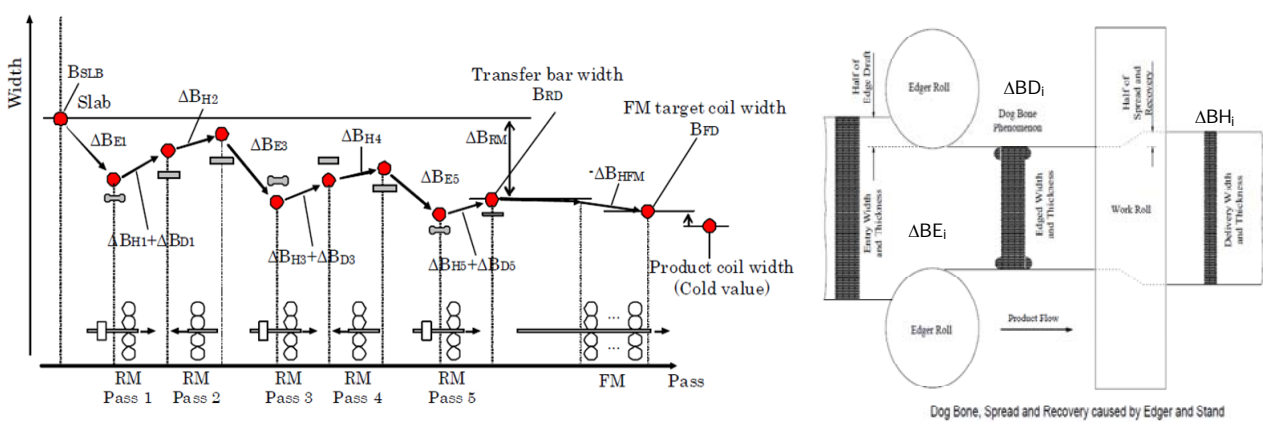
Porém, como em todo modelo de cálculo, a garantia de precisão é definitivamente complementada pelo RMLC, a parte do RSU responsável pelo aprendizado e correções automáticas de parâmetros das equações, com uma metodologia sofisticada e bastante original. O armazenamento de fatores de correção do aprendizado pode ser atrelado a eventos de mudança de lote, placa a placa e também a cada um dos passes de laminação, usualmente 3 ou 5 podendo chegar a 9, no laminador reversível R2. A aplicação da correção pode ser aditiva ou multiplicativa, de forma explícita, nas equações das variáveis passíveis de aprendizado.

A Tabela 2 lista os sub-modelos do RSU, indicando variáveis de processo calculadas, variáveis com verificação de limites em ciclos internos de execução do programa, e aquelas com função de aprendizado, com indicações da forma de atualização de sua adaptação.

Tabela 2. Sub-Modelos de cálculo do *set-up* do processo de desbaste RSU, dos laminadores de bordas E2 e desbastador R2

Item	Sub-Modelos
Sub-Modelos de Cálculo do Set-Up do Processo de Desbaste R2 & E2 RSUC	Evolução de Temperatura do material (temperatura na espessura média interna do esboço). Resistência à Deformação (tensão média de escoamento a quente) Força de Laminação (teoria de <i>Orowan</i>) Torque de Laminação Potência de Laminação Deslizamento à vante & ré (<i>forward & backward slip</i>) Equação do Gap (<i>Gagemetter & stretch calculation</i>) Alargamento (<i>spread</i>) Oso de Cachorro (<i>dog-bone</i>) Alargamento no LTQ2 (<i>spread</i>)
Sub-Modelos de Verificação de Limites R2 & E2 - RSUC	Redução – Torque – Potência - Ângulo de mordida - Comprimento de esboço.
Sub-Modelos de Adaptação R2 & E2 - RMLC	Adaptação da Resistência à Deformação : R2 (<i>lot to lot</i>) & E2 (<i>lot to lot & bar to bar</i>); (<i>both with scattering</i>) Adaptação da Força de Laminação: R2 & E2 (<i>bar to bar & pass to pass</i>) Adaptação do Torque : R2 (<i>lot to lot & bar to bar & pass to pass</i>) Adaptação da Largura : R2 & LTQ2 (<i>bar to bar</i>) Adaptação da Temperatura de Desenformamento : (<i>bar to bar</i>)

Por exemplo, a Figura 4 resume conceitos dos fenômenos que afetam a largura do material nos passes de desbaste: redução, alargamento e osso de cachorro, justificando a existência dos respectivos modelos de previsão no RSU.



Nota: $\Delta BX_i =$ variação de largura por passe; sendo $X = E =$ redução em passe ímpar ; $X = H =$ alargamento (spread) ; $X = D =$ osso de cachorro (dog-bone).

Figura 4. Fenômenos de alteração de largura da placa na laminação de desbaste.

Embora o *set-up* do posicionamento do laminador de bordas E2 esteja contido dentro do RSU, o controle da largura ao longo do comprimento da placa é um modelo à parte, também de nível-2, chamado *AWC (Automatic Width Control)*, composto pelas funções listadas na Tabela 3, com exemplos conceituais de algumas delas mostrados na Figura 5.

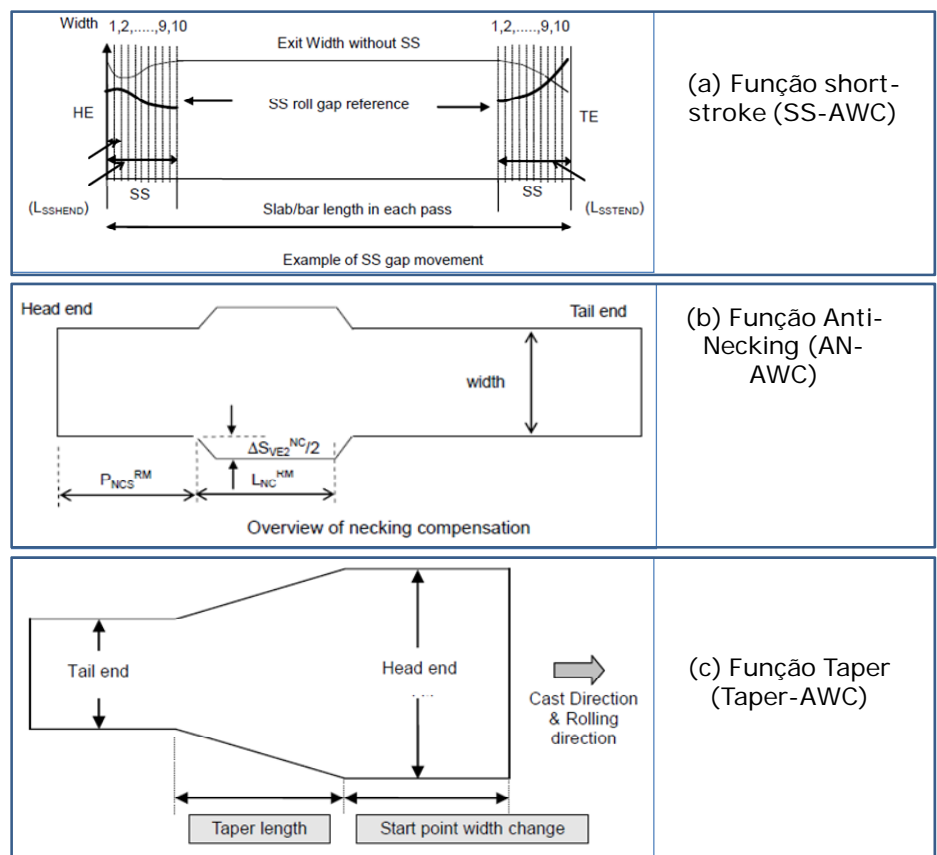


Figura 5 – Diagramas conceituais relacionados a 3 funções do modelo de controle de largura *AWC*: (a) *Short-Stroke*; (b) *Anti-Necking*; (c) *Taper*.

Tabela 3. Funções do modelo de controle de largura AWC do laminador de bordas E2

Sub-Modelos do AWC	Função
<i>Short-Stroke</i> SS-AWC	Compensação à vante da variação de força causada pela variação de temperatura ao longo do comprimento do esboço.
<i>Feed-Forward</i> FF-AWC	Eliminação da perda de largura causada pela redução de largura no início e final do esboço, mantendo um perfil retangular.
<i>Anti-Necking</i> AN-AWC	Compensação prévia da perda localizada de largura na tira, ou empescoçamento, no instante da aplicação de tensão de bobinamento na saída do LTQ2.
Regulação para Força Constante CFR-AWC	Manutenção de força mínima em passes muito leves, com redução de largura próxima de zero, para uniformidade de largura.
Laminação de placa trapezoidal Taper-AWC	Controle da redução de largura, em placas na forma de trapézio (<i>taper</i>), permitindo o aproveitamento das mesmas.

4 MODELOS DO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DO ESBOÇO DO R2 PARA O LTQ2

O modelo HTT⁽⁶⁾ (*Hold Transfer Table*) tem a função principal de gerar as referências de temperatura de entrada prevista (FET - *Finishing Delivery Temperature*) do esboço para os modelos de FSU (*Finishing Set-Up*) e FDTC (*Finishing Delivery Temperature Control*) de controle de temperatura de saída do LTQ2. Para tanto recebe do RSUC as temperaturas de nós da malha de um modelo de temperatura por diferenças finitas, da superfície e do centro da espessura do esboço na saída do R2, atualizando os seus valores para uma previsão desse perfil térmico do esboço na entrada do LTQ2.

O modelo de perda de calor por radiação do esboço em transferência é calculado com base nas seguintes informações de entrada: temperatura dos nós, fração de ferrita, tempo de transferência, dimensões do esboço, propriedades físicas do material, perfil de velocidades, fatores de ajuste, entre outros. A saída resultante são as atualizações de temperatura dos nós da malha de diferenças finitas, temperatura média do esboço e temperatura da superfície. Os valores de temperatura do esboço calculada e da temperatura medida pelo pirômetro na entrada do LTQ2 são então usados para compor o valor final de temperatura de entrada (*blended FET*) a ser utilizado pelo modelo de *set-up* FSU do LTQ2.

5 MODELOS DO PERFIL DE CILINDROS DOS LAMINADORES R2 E LTQ2

Os objetivos dos modelos de cilindros do R2 (ROP - *Roughing Roll Process*) e do LTQ2 (FOP - *Finishing Roll Process*)^(3,4,9) são essencialmente dois: estimar o coroamento devido à expansão térmica dos cilindros e calcular a quantidade de desgaste dos mesmos, ao longo da campanha entre trocas de cilindros, ou cone de laminação. Para atendimento do primeiro objetivo é necessário fornecer o perfil de temperaturas ao longo do eixo axial e radial, em pontos de uma malha bidimensional e simétrica, para cálculo da expansão térmica ou coroa térmica dos cilindros. Para tanto são considerados os seguintes mecanismos de transferência de calor no método de diferenças finitas: condução de calor entre superfícies de cilindro e material laminado, perda de calor para água de resfriamento, por convecção para o ar, por radiação ao ar, e fluxo de calor trocado com os mancais e pescoços do cilindro. O segundo objetivo de fornecer o perfil de desgaste do cilindro é alcançado

com um algoritmo de cálculo de abrasão considera a força específica, tipo de cilindros e o número acumulado de revoluções, entre outros.

A composição de resultados dos modelos de temperatura e abrasão permite o cálculo cíclico e atualizado dos perfis de cilindros, necessários também para definir o valor da abertura de cilindros entre passes de laminação, garantindo assim a obtenção da espessura visada.

6 MODELOS DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE DO LTQ2

O modelo FSU⁽⁷⁾, de *set-up* do LTQ2, é composto de dois macro-modelos com finalidades de realizar o cálculo principal, e o cálculo dos fatores de adaptação, conforme sugerido na Figura 6.

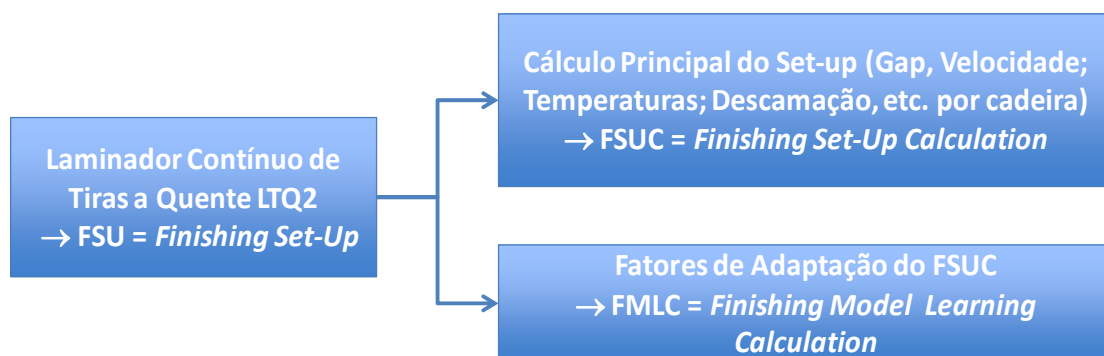


Figura 6. Macro-modelos de controle do processo de laminação de tiras a quente.

Os sub-modelos do FSU são listados na Tabela 4, bem como os de variáveis de processo principais, variáveis com verificação de limites e aquelas com função de aprendizado, com as respectivas formas de atualização dos fatores.

Tabela 4. Sub-modelos de cálculo do *set-up* do processo de laminação de tiras a quente FSU do LTQ2

Item	Sub-Modelos
Sub-Modelos de Cálculo do Set-Up do Processo de Tiras a Quente (LTQ2) - FSUC	Evolução de Temperatura do material (FET - FDT). Resistência à Deformação (tensão média de escoamento a quente) Força de Laminação (teoria de <i>Orowan</i>) Torque de Laminação Potência de Laminação Deslizamento à vante & ré (<i>forward & backward slip</i>) Equação do Gap (<i>Gagemetter & stretch calculation</i>)
Sub-Modelos de Verificação de Limites do LTQ2 - FSUC	Torque – Força – Redução – Ângulo de Mordida – Velocidade, na forma de matriz de decisão, com algumas verificações para o topo e meio do comprimento da tira.
Sub-Modelos de Adaptação do LTQ2 - FMLC	Adaptação da Resistência à Deformação : (<i>lot to lot with scattering</i>) Adaptação da Força de Laminação : (<i>bar to bar & lot to lot; by stand</i>) Adaptação do Torque : (<i>lot to lot & bar to bar ; by stand</i>) Adaptação do Gap : (<i>bar to bar; head & tail; by stand; cycle</i>) Adaptação da Temperatura de Zonas : (<i>lot to lot; by stand</i>) Adaptação da Temperatura de Saída (FDT): (<i>bar to bar; vernier</i>)

O modelo FSUC, definidor do *set-up* do LTQ2, possui abordagem refinada e moderna. Nele são destacadas as abordagens do cálculo da resistência a quente, uma mescla entre equações usuais e matrizes de influências de tipo e composição química do material laminado, do método de verificação de possibilidade de laminação através da matriz de limites de capacidade do laminador, e da estruturação geral do mecanismo de adaptação das equações de variáveis críticas. Todo o cálculo de modelos da linha, incluindo o FSU do LTQ2, utiliza previsões de velocidade do material, que vão sendo atualizadas de acordo com a posição do mesmo durante sua movimentação desde o forno até o seu bobinamento final. No caso do FSU o cálculo da escala de reduções (*draft*) é iniciado a partir de duas informações básicas. Uma delas é o plano de distribuição de carga, que considera a distribuição da força de laminação de cada cadeira, pelo método FDRM⁽¹⁾ (*Roll Force Distribution Method*). A outra, necessária para inicialização do procedimento FDRM, é a escala inicial de espessuras entre passes. A Figura 7 mostra o conceito básico do método.

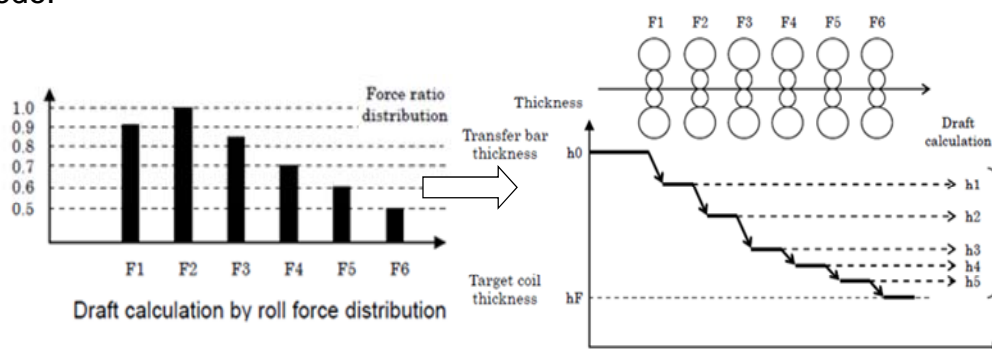


Figura 7. Método de distribuição de força de laminação como base do cálculo da escala de espessuras entre cadeiras (FRDM¹). A força máxima assume valor unitário, com as demais sendo normalizadas para valores entre 0 e 1.

Para minimizar as iterações de cálculo do FRDM, a estimativa inicial de espessuras é dada por um método que extrapola espessuras tabeladas através de um modelo interpolador que considera o alongamento da tira em cada cadeira, entre outras variáveis.

7 MODELOS DE CONTROLE DA TEMPERATURA DE SAÍDA DO LTQ2

Em nível-2 são geradas as referências para o controle dinâmico FDTC⁽⁷⁾ (*Finishing Delivery Temperature Control*) para obtenção da temperatura de acabamento ou de saída do LTQ2. A temperatura na ponta inicial da tira, na região de *set-up*, é garantida pelo cálculo de velocidade realizado pelo FSU. A temperatura da porção restante do corpo até o final da tira depende da ação do FDTC.

O FDTC pode utilizar dois modos de controle, sendo o primeiro deles através do uso de taxas de aceleração aplicada à tira do LTQ2, e o segundo através do fluxo de resfriamento entre cadeiras realizado por coletores dedicados à esta função, existentes entre as cadeiras F2 a F6.

Além disso, o FDTC admite ainda duas funcionalidades. A primeira se baseia no controle à vante (FF- FDTC) e a segunda no controle com retroalimentação da temperatura de acabamento medida pelo pirômetro localizado na saída do LTQ2 (FB-FDTC).

A Figura 8 mostra o conceito de como funciona a atuação do FTDC. O método de cálculo por diferenças finitas para cálculo de temperaturas é extensamente usado também no caso do modelo de controle FDTC.

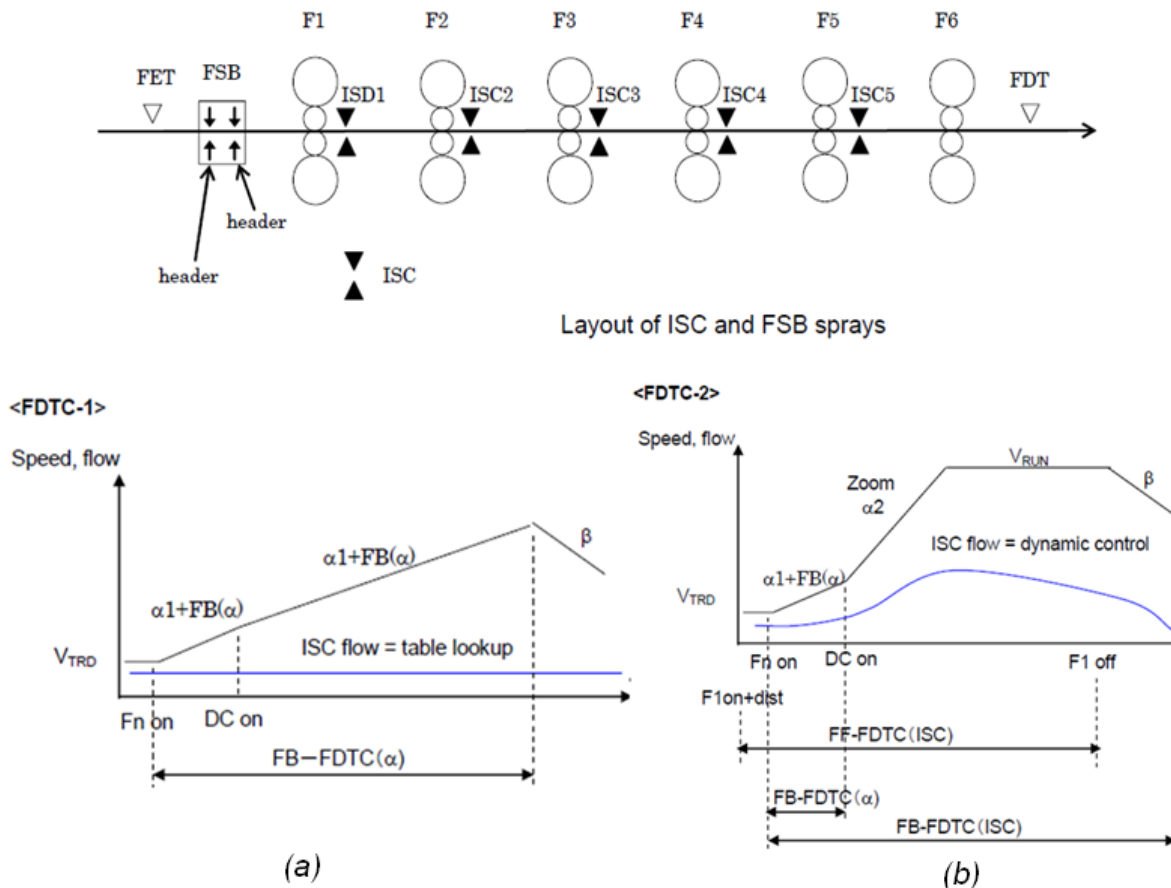


Figura 8. Diagramas esquemáticos ilustrando a ação do controle dinâmico de temperatura FDC: (a) FDTC-1, modo 1, funcionalidade *feedforward*, com uso da modificação da aceleração da tira; e (b) FDTC-2, modo 2, funcionalidade *feedback*, com uso da vazão do sistema de resfriamento entre cadeiras (ISC - *inter-stand cooling*).

8 MODELOS DE CONTROLE DE PERFIL E PLANICIDADE DA TIRA

O Controle Automático de Perfil e Planicidade da Tira Laminada a Quente APFC⁽⁹⁾ (*Automatic Profile & Flatness Control*) visa garantir dentro de limites especificados essencialmente a coroa da tira e a sua planicidade, nos modos de ocorrência ondulação central (*center buckle*) e lateral (*edge wave*).

O controle do APFC é efetivado através dos seguintes dispositivos aplicados aos cilindros de trabalho do LTQ2: sistema de *Work-Roll Bender* que flexiona cilindros nas cadeiras F1 a F6, sistema de *Work-Roll Pair-Cross* que cruza cilindros na F1 a F4, sistema de *Work-Roll Shift* que desliza axialmente os cilindros na F5 e F6. Desta forma é possível compatibilizar o perfil final de cilindros com o objetivo de perfil de tira visado e adequada planicidade da mesma.

A Tabela 5 relaciona as principais características do APFC, tanto do modelo de cálculo do *set-up*, como das funções para controle dinâmico, nesse caso aplicável apenas ao sistema de flexão de cilindros.

Tabela 5. Sub-modelos de cálculo do *set-up* e controle dinâmico do processo de obtenção do perfil e planicidade da tira laminada no LTQ2, ou APFC

Item	Sub-Modelos ou funções
Modelo de Cálculo do Set-Up dos Sistemas de Flexão (<i>Bender</i>) – Cruzamento (<i>Pair Cross</i>) – Deslocamento (<i>Shift</i>) dos cilindros do LTQ2 – APFC	Cálculo do Perfil do Esboço Seleção do Deslocamento do Shift-Roll Cálculo de coeficientes de Perfil (Coroa) e Planicidade Cálculo da Coroa Térmica de cilindros de trabalho Cálculo do Desgaste por Abrasão Definição do Set-Up de Bender & Pair Cross Determinação do Perfil de Deformação do Cilindro .
Modelos de Funções de Controle Dinâmico do Sistema de Flexão de Cilindros de Trabalho (<i>Work Roll Bender</i>) do LTQ2 - APFC	Compensação de <i>Bender</i> para o Topo da Tira Controle Retroalimentado pelo Medidor de Planicidade Compensação de Variação da Força de Laminação Compensação de Coroa Térmica <i>Set-Up</i> Dinâmico de Coroa

O cálculo dos coeficientes de planicidade utiliza conceitos consagrados, como o da diferença das razões entre coroa e espessura da tira na entrada e na saída dos passes, porém refinados com parâmetros de hereditariedade e de adaptação também incluídos nas equações. Já o modelo de cálculo de coeficientes de perfil da tira utiliza rede neural para simplificar e tornar ágil o controle, a partir de uma análise inicial *off-line* por elementos finitos que forneceu os valores alvo para treinamento da rede.

Tanto o cálculo da coroa térmica quanto o da quantidade de abrasão utilizam, embora em cálculos separados e dedicados ao modelo APFC, os mesmos métodos utilizados pelo FSU para uso na equação do *gap* de cilindros.

Uma vez definidos os ajustes de *bender* e *pair-cross*, a avaliação final da deformação de cilindros considera tanto a flexão pela carga distribuída no contato entre tira e os cilindros de trabalho e os de encosto, como os correspondentes achatamentos elásticos.

Já o deslocamento do *shift-roll* é realizado através de seleção hierárquica de parâmetros de laminação e tipo de material laminado, entre outros.

9 AMBIENTE DE AUTOMAÇÃO

Em nível-2, uma vasta quantidade de tarefas é executada em tempo real, para processamento dos programas dos modelos de controle de operação. Tanto o grau de especialização como a extensão do assunto fogem ao escopo do presente texto, onde cabem apenas alguns comentários mais relevantes. A Figura 9 mostra uma visão das tarefas de nível-2 e do fluxo de informações e relacionamento do nível-2 (automação) com o nível-1 (controle elétrico).

Na parte direita da Figura 10 são vistos os programas dos modelos matemáticos, todos utilizando linguagem C++, orientada a objetos, sendo interfaciados com as demais tarefas por uma função específica de modelo (MDL_JOB), que também administra a gravação de dados de cálculo e processo em uma base de dados dedicada.

A função central que faz a ligação entre as tarefas de modelo, obtenção de dados reais (GAT_JOB), envio de *set-up's* (SET_JOB) e ainda do modelo de controle do ritmo da linha (MPC) é a de rastreamento ou *tracking* geral do material (TRK_JOB).

Todo esse ambiente utiliza linguagem de programação *script*, específica para controle do nível-2, e permite o uso de ferramentas de manutenção com base em

macros de planilhas eletrônicas, geradoras de códigos *script*, além de linguagens de bancos de dados comerciais, e como mencionado C++ para os programas dos modelos matemáticos de controle da operação.

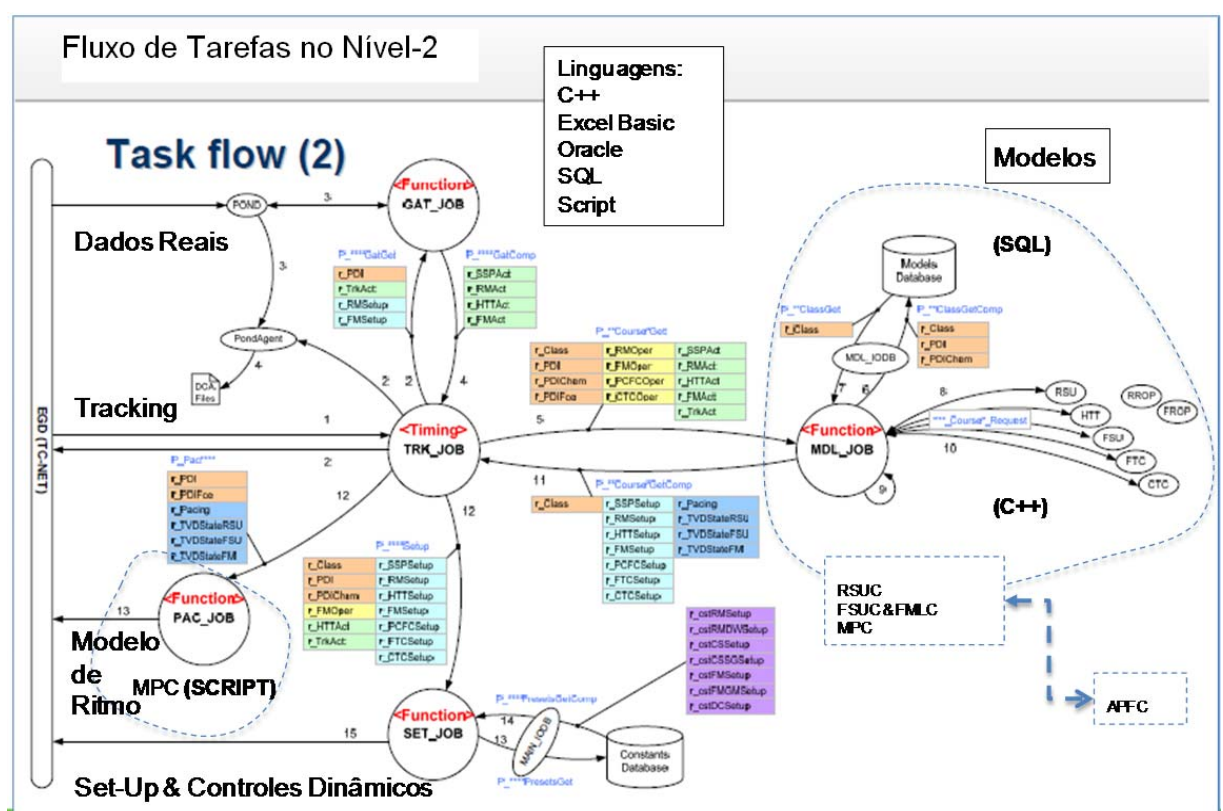


Figura 9. Desenho esquemático simplificado do ambiente de tarefas necessárias ao processamento dos modelos de controle de operação.

10 CONCLUSÕES

Os laminadores de linhas de tiras a quente modernas demandam um grande escopo de modelos para controle do processo de laminação, conforme mostrado neste trabalho com a descrição básica e conceitual dos modelos de controle de operação da Linha de Tiras a Quente 2 da Usiminas Cubatão.

Nessa configuração inicial de referência, além de aspectos fundamentais comuns aos modelos de nível-2 dos laminadores de desbaste R2, de bordas E2 e de tiras a quente LTQ2, como os de cursos de execução e organização hierárquica de parâmetros, foram listados os modelos e funções específicas do cálculo de *set-up*, da checagem de limites e da definição dos parâmetros de aprendizado de variáveis de cálculo primordiais. Foram ainda fornecidas as bases conceituais dos modelos auxiliares de cálculo de temperaturas do material laminado, de perfis térmicos e de desgaste dos cilindros.

Complementando as descrições, foram destacados tópicos característicos, como o de conceitos de eventos de alteração de largura e seu controle na laminação de desbaste, tanto na previsão de *set-up* do R2 e E2, bem como em funções de atuação dinâmica ao longo do comprimento do esboço. Já para o LTQ2, foram abordados aspectos do controle de velocidade do material, do método de distribuição de carga e da obtenção da temperatura de saída. O controle de perfil e planicidade da tira foram abordados com relação a seus respectivos modelos de *set-up*, com apenas uma breve menção das funções dinâmicas disponíveis.

Finalmente, foi dada uma visão geral do ambiente de fluxo de tarefas de nível-2 dentro do ambiente de automação, no qual se inserem os programas dos modelos de controle de operação.

REFERÊNCIAS

- 1 TSUGENO, Masashi; SEKIGUCHI, Kunio; ANBE, Ysohiharu. Application of na On-Line Schedule Calculation Based on Roll Force Ratio Distribution. Journal of the JSTP, vol 37 no 437, November-1996.
- 2 OHARA Kazuhiro; TSUGENO, Masashi; CHEN Ming-Fa; PAN Yeong-Tsuen; HONDA Kozo; NAKAEMA Masaki. System for Predicting the Material Properties of Hot Rolled Steel; Proc. AISE Annual 9; Convention, 2002.
- 3 TSUGENO, Masashi; OHARA Kazuhiro; Commom Description of Model Funcions – Manual reservado da Toshiba-Mitsubishi, Fevereiro-2010, 118 p.
- 4 TSUGENO, Masashi; OHARA Kazuhiro; Rouhing Mill Set-Up Calculation – Manual reservado da Toshiba-Mitsubishi, Fevereiro-2010, 141 p.
- 5 TSUGENO, Masashi; OHARA Kazuhiro; Automatic Width Control Calcualtion – Manual reservado da Toshiba-Mitsubishi, Fevereiro-2010, 141 p.
- 6 TSUGENO, Masashi; OHARA Kazuhiro; Holding Transfer Model – Manual reservado da Toshiba-Mitsubishi, Fevereiro-2010, 32 p.
- 7 TSUGENO, Masashi; OHARA Kazuhiro; Finishing Delivery Temperature Control – Manual reservado da Toshiba-Mitsubishi, Fevereiro-2010, 118 p.
- 8 TSUGENO, Masashi; OHARA Kazuhiro; Finishing Mill Set-Up Calculation – Manual reservado da Toshiba-Mitsubishi, Fevereiro-2010, 171 p.
- 9 YAMANE, M., Functional Description of APFC, Manual reservado da Mitsubishi-Hitachi, Fevereiro-2009, 269 p.