

UTILIZAÇÃO DE SET-UP DINÂMICO (DSU) NO LTQ1 ¹

Pedro Segundo da Silva Vallim ²
Aguinaldo de Almeida ³
Domingos Savio Gomes Sampaio ⁴
Heli Lacerda Gomes ⁵

Resumo

Modelos matemáticos de cálculo do *gap* em laminadores automatizados, para aplicação antes da mordida do material nas cadeiras, usualmente garantem uma boa precisão de espessura na ponta inicial da tira laminada a quente. Uma melhoria adicional é conseguida pela utilização de uma atualização dessa previsão inicial de *set-up*, através do erro de previsão da força de laminação nas cadeiras iniciais F1 a F3, compensado com uma correção do *gap* nas cadeiras finais F5 e F6 do LTQ1, na forma de controle dinâmico do tipo à vante, ou *feed-forward*. Com a utilização da função de *set-up* dinâmico, no LTQ1 da Usiminas Cubatão, obteve-se um aumento estatisticamente significativo da participação do número de bobinas produzidas dentro do acerto de espessura visado na ponta inicial da tira, na região de *set-up*, com expressiva redução do índice de sucata de tiras.

Palavras-Chave: Laminação de tiras a quente; Correção dinâmica de *Set-Up* de LTQ; Acerto de espessura da tira a quente; Controle *Feed-Forward* de *Set-Up* do LTQ.

APPLICATION OF DYNAMIC SET-UP (DSU) IN THE HSM1

Abstract

Mathematical models for calculating the *gap* in automated mills for application before the bite of the material on the stands, usually provide a good accuracy of the thickness at the head end of the hot rolled strip. An additional improvement is achieved by use of an update to this initial forecast *set-up* through the forecast error of the force of initial rolling stands F1 to F3, offset by a correction of the *gap* in the final stands F5 and F6 of the HSM1, in form of dynamic control of forward type, or *feed-forward*. With the use of the function of dynamic *set-up* in Usiminas Cubatão HSM1, it was obtained a statistically significant increase in the participation of the number of coils produced within the accuracy of target thickness on the head end of the strip, in the portion of *set-up*, with a significant reduction in the rate of strip scrapping.

Keywords: Hot strip rolling; Dynamic correction of the HSM *Set-Up*; Settlement of thickness of hot strip; *Feed-Forward* control of the HSM *set-up*.

¹ Contribuição técnica ao 47º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 26 a 29 de outubro de 2010, Belo Horizonte, MG.

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

³ Engenheiro Elétrico da Gerência de Manutenção da Laminação a Quente da Usiminas Cubatão – SP - Brasil. E-Mail: aguinaldo@usiminas.com

⁴ Engenheiro de Automação da Companhia Brasileira de Projetos - Cobrapi. E-Mail: dsgsampaio@uol.com.br

⁵ Técnico Metalúrgico, Assistente de Operação da Gerência de Operação da Laminação a Quente da Usiminas Cubatão – SP - Brasil. E-Mail: heli.lacerda@usiminas.com

1 INTRODUÇÃO

O Laminador de Tiras a Quente 1 (LTQ1) da Usiminas Cubatão é um laminador quádruplo contínuo de 6 cadeiras, com produção iniciada em 1963, e que sofreu uma atualização tecnológica de seus sistemas de automação (nível-2) e de controle elétrico (nível-1) em 2001.

Sua função, dentro da Linha de Tiras a Quente 1, é reduzir a espessura do material oriundo da laminação de desbaste, de forma a originar uma tira laminada a quente de espessura 2,0 mm a 12,8 mm, nas larguras de 680 mm a 1.620 mm, garantindo as dimensões programadas de seu produto. Deve ainda cumprir as temperaturas de entrada e saída programadas, contribuindo para as propriedades mecânicas e metalúrgicas visadas, além de também atender requisitos de perfil transversal e de planicidade, bem como de qualidade superficial conforme padrões especificados.

Em um conceito mais restrito, porém suficiente para o tema deste trabalho, por *set-up* das cadeiras do LTQ deve ser entendido o conjunto de informações de abertura entre cilindros, ou *gap*, e velocidade dos mesmos, em cada passe de laminação.

No passe de laminação, ou passagem do material em cada cadeira, é reduzida a espessura do esboço, desde o primeiro até o último passe, obtendo-se assim a espessura final visada na saída da última cadeira, dentro de tolerâncias especificadas e com uma condição de fluxo de massa constante entre cadeiras.

A definição do *set-up* inicial é feita através de programas que, em ambiente de nível-2, rodam modelos matemáticos responsáveis por fornecer a previsão do *gap* e velocidade de cilindros necessários para a laminação estável e precisa da ponta inicial da tira, antes da sua chegada à zona do laminador.

Após a captura da tira em cada cadeira, e laminado um pequeno trecho do início do material, o controle do *gap* e fluxo de massa é realizado por sistemas automáticos de nível-1 para controle de espessura, ou *AGC (Automatic Positioning Control)*, e de controle de fluxo de massa, ou *LPC (Looper Positioning Control)*, que, entre outros, garantem a laminação estável de todo o comprimento da tira, dentro da precisão de espessura e largura visadas.

O objetivo desse trabalho é fornecer uma descrição da função que fornece parâmetros de atualização dinâmica do *set-up* prévio de nível-2 nas cadeiras finais do laminador, após a laminação da ponta da tira pelas cadeiras iniciais. São ainda descritas a aplicação dessa função de *set-up* dinâmico, ou *DSU (Dynamic Set-Up)*, e mostrados resultados obtidos com o seu uso no LTQ1.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Sistema de Controle de Set-up

Na Figura 1, é mostrada uma visão esquemática do atual sistema de controle de *set-up* do LTQ1, de nível-2, do ponto de vista do fluxo de tarefas do modelo matemático de cálculo de *set-up*, ou *FSU* (*Finishing Set-Up Calculation*).⁽¹⁾

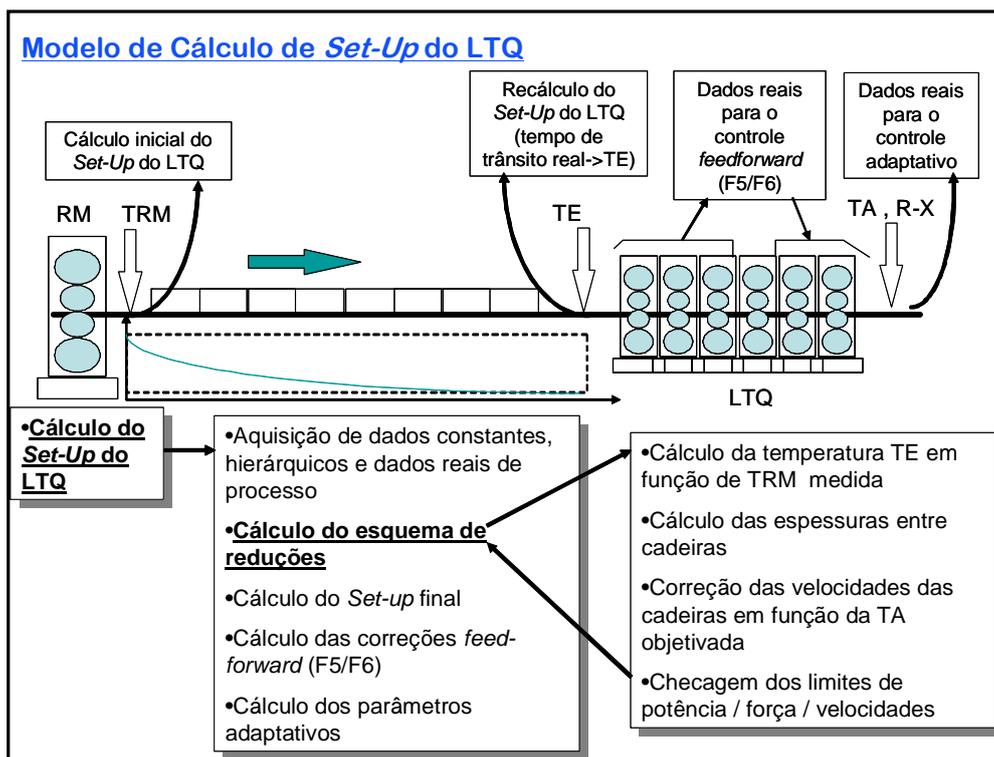


Figura 1. Visão geral da seqüência das tarefas de cálculo do modelo matemático do sistema automático de controle de *set-up*, *FSU*, de nível-2, do LTQ1.

O *FSU* é executado com a ponta do esboço na zona de saída do Laminador Esboçador RM, e na chegada do mesmo à zona de entrada do LTQ. Na Figura 1 são listadas algumas das principais tarefas de cálculo realizadas a cada execução do *FSU*.

Com a ponta da tira tendo sido laminada nas cadeiras iniciais, F1, F2 e F3, o *set-up* inicialmente definido para as cadeiras finais F5 e F6 sofre atualização através do controle dinâmico *feed-forward* do *DSU* (*Dynamic Set-up Calculation*).⁽¹⁾

Após a finalização da laminação de toda a tira, e a partir da obtenção de dados reais de seu processamento, é realizada a função de aprendizado do *FSU*, ou *learning*,⁽¹⁾ que adapta parâmetros de algumas de suas principais equações, que serão aplicadas no cálculo do *set-up* de tiras subsequentes.

O resultado do cálculo do *FSU* consiste principalmente na previsão da força de laminação, do valor da espessura e da velocidade de saída da tira em cada cadeira, com a premissa da manutenção do adequado fluxo de massa do material no laminador. Porém, de forma genérica, isto não é suficiente para a definição final do *set-up*, já que para isto é necessário estabelecer o *gap* de abertura dos cilindros e a velocidade dos mesmos.

Assim, “funções de transferência” relacionam força de laminação e espessura do material com o correspondente *gap* de cilindros de trabalho, e a velocidade do material com a velocidade de rotação dos cilindros.⁽¹⁻⁶⁾

No caso do *gap*, a curva de rigidez da cadeira (característica da cadeira) associada à curva de plasticidade do material laminado (característica do material) é mostrada em um diagrama de controle operacional⁽⁴⁾ que fornece a relação entre a espessura de entrada e saída do passe, força de laminação e finalmente o *gap* de cilindros. A Figura 2 ilustra esquematicamente o diagrama de controle operacional.

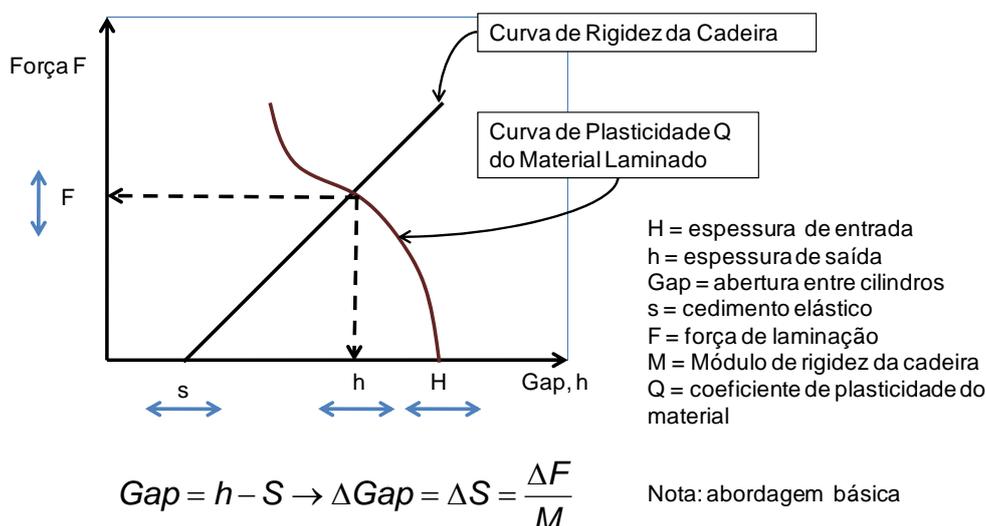


Figura 2. Diagrama de controle operacional básico relacionando a força F de laminação, espessuras de entrada e saída da cadeira, e *gap* de abertura de cilindros de trabalho, através da curva de rigidez da cadeira e da curva de plasticidade do material laminado.

A função que relaciona a velocidade do material com a velocidade dos cilindros é função do deslizamento relativo existente entre cilindro de trabalho e tira laminada, bem como da equação de constância do fluxo de massa.

O detalhamento do cálculo do *gap* e da velocidade dos cilindros é bastante detalhado na literatura especializada em laminação, e depende da teoria e métodos adotados, sendo em última análise parte integrante da tecnologia de controle utilizada no laminador.⁽¹⁻⁶⁾

2.2 Fundamento Teórico do *Set-up* Dinâmico (*DSU*)

Sendo o foco desse trabalho a correção à vante (*feed-forward*) do *set-up* inicial definido para as cadeiras F5 e F6, é dada a seguir uma descrição da fundamentação teórica que explica o método adotado para o *DSU*.

Algumas premissas são consideradas para a realização da função de *DSU*:

- 1º Os erros de previsão das forças de laminação nas cadeiras iniciais F1, F2 e F3 do LTQ sinalizam que haverá um erro de espessura na entrada e na saída das cadeiras finais F5 e F6, atendendo a um aspecto de herança de processamento.
- 2º A determinação da influência dos erros de força no erro de espessura deve levar em conta o conhecimento de parâmetros como o módulo de rigidez das cadeiras, plasticidade do material e esquema de espessuras ou reduções das cadeiras (“funções de transferência”).
- 3º O *DSU* somente corrige o *gap* das cadeiras F5 e F6 se os erros de força nas cadeiras F1, F2 e F3 tiverem o mesmo sentido, para mais ou para menos, simultaneamente.
- 4º O valor da correção deverá estar dentro de limites pré-estabelecidos.

Em forma de pseudo-código livre, considera-se então o seguinte procedimento para definição da correção do *gap* da F5 e F6:

Se: $\text{sin al}(\Delta F_1) = \text{sin al}(\Delta F_2) = \text{sin al}(\Delta F_3)$, então

$$\rightarrow \Delta S_i = \sum_{j=1}^3 (a_{\Delta F_{ji}} \times \Delta F_j)$$

Senão

$$\rightarrow \Delta S_i = 0$$

Sendo:

i = cadeiras com *DSU* = F5, F6

j = cadeiras com erro de força captado = F1, F2, F3

ΔF_j = erro de força na cadeira j

$a_{\Delta F_{ji}}$ = coeficiente efetivo do erro de força da cadeira j aplicado ao *DSU* na cadeira i

ΔS_i = correção do *gap* na cadeira i com *DSU* ativo

Para simplificação do algoritmo, sem perda significativa de efetividade, considera-se apenas a influência do erro de força da cadeira F3:

Se (j = 1 ou j = 2) então $\rightarrow a_{ji} = 0$, se não \rightarrow Calcula-se a_{ji}

j = 1 a 3; i = 5, 6

Assim, levando-se em conta o erro de *gap* na entrada e na saída da cadeira i:

$$\Delta S_i = g_3 \times ((\Delta S_i)_{ENTRADA} + (\Delta S_i)_{SAÍDA}), \dots i = 5,6$$

$$\rightarrow \Delta S_i = g_3 \times \left(\frac{(\Delta F_i)_{ENTRADA}}{M_i} + \frac{(\Delta F_i)_{SAÍDA}}{M_i} \right)$$

Por sua vez o erro de força ΔF ocorre devido à variações de espessura na entrada ΔH e saída Δh da cadeira (i):

Entrada.da.cadeira :

$$\Delta H_i = H_{i1} - H_{i0}$$

$$(\Delta F_i)_{ENTRADA} = \left(\frac{\partial F_i}{\partial H_i} \right) \times \Delta H_i$$

Saída.da.cadeira :

$$\Delta h_i = h_{i1} - h_{i0}$$

$$(\Delta F_i)_{SAÍDA} = (M_i + Q_i) \times \Delta h_i$$

Isso leva à expressão de geral de cálculo da correção de *gap* para as cadeiras (i=5,6) em função do erro de força da cadeira (j = 3)

$$\rightarrow \Delta S_i = g_3 \times \left(\left(\frac{\left(\frac{\partial F_i}{\partial H_i} \right)}{M_i} \right) \times \Delta H_i + \left(\frac{(M_i + Q_i)}{M_i} \right) \times \Delta h_i \right)$$

$$i = 5,6$$

$$j = 3$$

Resta estimar os erros de espessura na entrada (ΔH_i) e saída (Δh_i) da cadeira i.

No caso da cadeira F5, considera-se o erro de espessura de entrada:

$$\Delta H_i \neq 0 \rightarrow (\Delta S_i)_{ENTRADA} \neq 0$$

$$\Delta S_5 = g_3 \times \left(\left(\frac{\left(\frac{\partial F_5}{\partial H_5} \right)}{M_5} \right) \times \Delta H_5 + \left(\frac{(M_5 + Q_5)}{M_5} \right) \times \Delta h_5 \right)$$

$$\Delta H_5 = \left(\frac{\Delta F_3 / M_3}{h_3} \right) \times H_5 = \left(\frac{\Delta F_3 / M_3}{h_3} \right) \times h_4$$

$$\Delta h_5 = \left(\frac{\Delta F_3 / M_3}{h_3} \right) \times h_5$$

$$\rightarrow a_{\Delta F_3,5} = \frac{\Delta S_5}{\Delta F_3} = \left(\frac{g_3}{(M_5 \times h_3)} \right) \times \left(\left(\frac{\partial F_5}{\partial H_5} \right) \times h_4 + (M_5 + Q_5) \times h_5 \right)$$

No caso da cadeira F6, considera-se o erro de espessura de entrada nulo:

$$\Delta H_i = 0 \rightarrow (\Delta S_i)_{ENTRADA} = 0$$

$$\Delta S_6 = g_3 \times \left(\frac{(M_6 + Q_6)}{M_6} \right) \times \Delta h_6$$

$$\Delta h_6 = \left(\frac{\Delta F_3 / M_3}{h_3} \right) \times h_6$$

$$\rightarrow a_{\Delta F_3,6} = \frac{\Delta S_6}{\Delta F_3} = \left(\frac{g_3}{(M_6 \times h_3)} \right) \times ((M_6 + Q_6) \times h_6)$$

Com a determinação dos coeficientes efetivos $a_{\Delta F_3,i}$, e de posse do erro de força na cadeira F3, ficam assim determinadas as correções de *gap* ΔS_{3i} das cadeiras $i = F5, F6$.

2.3 Aplicação do Set-up Dinâmico (DSU)

Via comunicação em tempo real, são passados do sistema de automação de nível-2 para o controle elétrico de nível-1, responsável pelo reposicionamento do *gap* da F5 e F6, os parâmetros necessários para o controle dinâmico do *set-up*:

- parâmetros calculados pelo FSU e DSU: módulos de rigidez, coeficientes de plasticidade, taxas de variação de força em função da variação de espessura, espessuras calculadas, e coeficientes efetivos, entre outros;
- limites hierárquicos, em funções do *steel grade*, espessura e largura da tira, para a correção final do *gap* pelo DSU, por cadeira (F5, F6).

Na Figura 3 são mostradas três cartas que exemplificam a aplicação do DSU em 2 de 4 tiras de dimensões 2.75 x 1223 mm laminadas seqüencialmente no LTQ1.

Na Figura 3.a são mostrados os erros de força expressos em porcentagem, de cada uma das cadeiras F1 a F6 do LTQ1. Para a 1ª e 3ª tiras, o sentido de variação dos erros de força não tem sinal idêntico simultaneamente nas cadeiras F1 a F3, ao contrário da 2ª e 4ª tiras.

Assim, nas cadeiras F5 e F6 a correção dinâmica resultante da ação do DSU só se realiza para a 2ª e 4ª tiras, de forma coerente com a sinalização dos respectivos erros de força das cadeiras F1 a F3, conforme pode ser observado na carta da Figura 3.b que mostra o desvio de posicionamento do *gap* de cada uma das cadeiras.

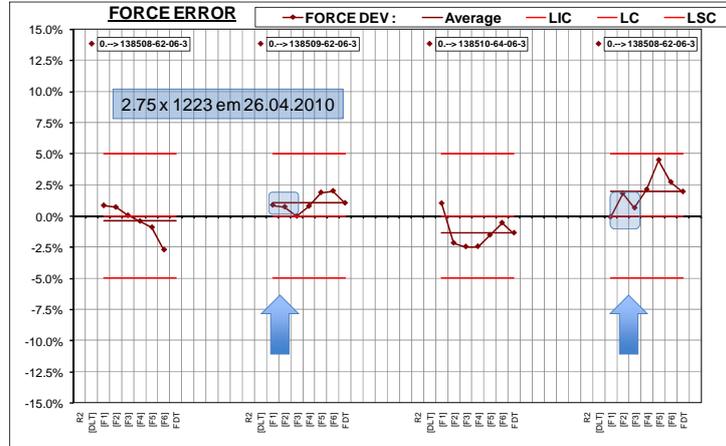
Nota-se nas cadeiras F5 e F6 da 2ª e 4ª tiras que esse desvio é significativo, e da ordem de -70 a -80 microns, no sentido de fechamento do *gap*, em relação ao valor inicialmente definido pelo último cálculo do FSU. Nas demais cadeiras o erro de posicionamento é próximo de zero.

Na 1ª e 2ª tiras, como o erro de força nas cadeiras F1 a F3 tiveram sentidos distintos, não é detectada a ação do DSU corrigindo o *gap* das cadeiras F5 e F6, como esperado. Finalmente, na Figura 3.c são mostrados os desvios de espessura de cada cadeira e o valor final medido pelo equipamento de medição de raios-x instalado na saída do laminador, de forma geral mantido entre -35 e +11 microns, nos exemplos mostrados.

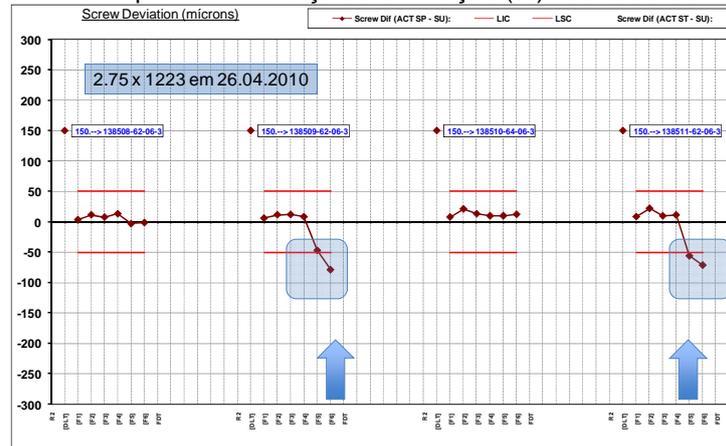
Desta forma, sob um ponto de vista prático é obtida uma visão da ação do DSU.

Qualquer erro de força de mesmo sinal nas cadeiras iniciais, através do DSU dispara um ajuste do *gap* das cadeiras finais, dentro de limites aceitáveis de correção máxima, com o objetivo de produzir uma melhoria do acerto de espessura final na região de *set-*

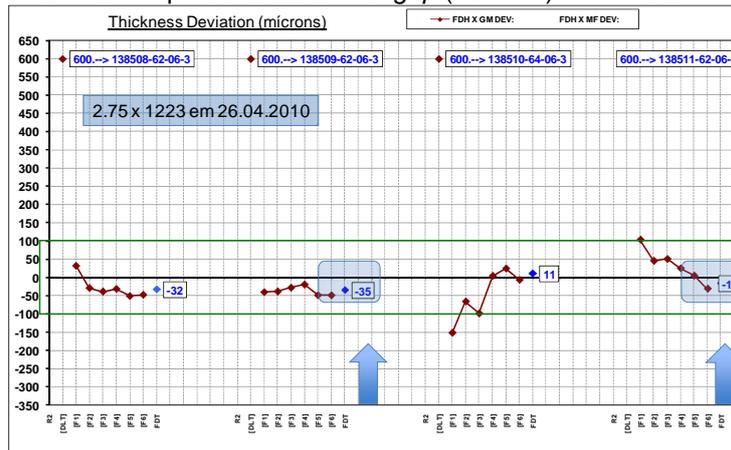
up, ou ponta inicial, da tira laminada a quente, e conseqüentemente, um fluxo de massa mais adequado.



(a) Erro de previsão de força de laminação (%) nas cadeiras F1 a F6



(b) Desvio de posicionamento do gap (microns) nas cadeiras F1 a F6



(c) Desvio de espessura (microns) nas cadeiras F1 a F6

Figura 3. Exemplo de caso real de aplicação do DSU em 2 de 4 tiras laminadas no LTQ1: (a) erro de força por cadeira; (b) desvio de gap e (c) acerto de espessura. Coerentemente com o sinal de erros de força nas cadeiras F1, F2, e F3, o gap foi corrigido nas cadeiras F5 e F6 na 2ª e 4ª tiras.

3 RESULTADOS

O modelo matemático de *set-up*, *FSU*, utilizado pelo sistema de automação do laminador (*Melco*) sempre produziu bobinas com acerto geral de espessura acima da mínima quantidade garantida pelo sistema original *Melco*, em condições usuais de laminação. Isso, apesar da garantia ser dada para condições bem mais controladas de produção como exigidas no teste final de aceitação (*FAT = Final Acceptance Test*) do sistema.

Com a utilização da função de *set-up* dinâmico, *DSU*, adicionalmente ao *FSU*, houve mudança estatisticamente significativa do patamar de quantidade de bobinas com ponta inicial, região de *set-up*, dentro da tolerância de garantia prevista no *FAT*, conforme mostrado na Figura 4. Cabe ressaltar que essa tolerância de *FAT* é inferior em média em cerca de 50% às previstas em normas estabelecidas, como por exemplo ASTM- A-568⁽⁷⁾ e ASTM-A-635.⁽⁸⁾

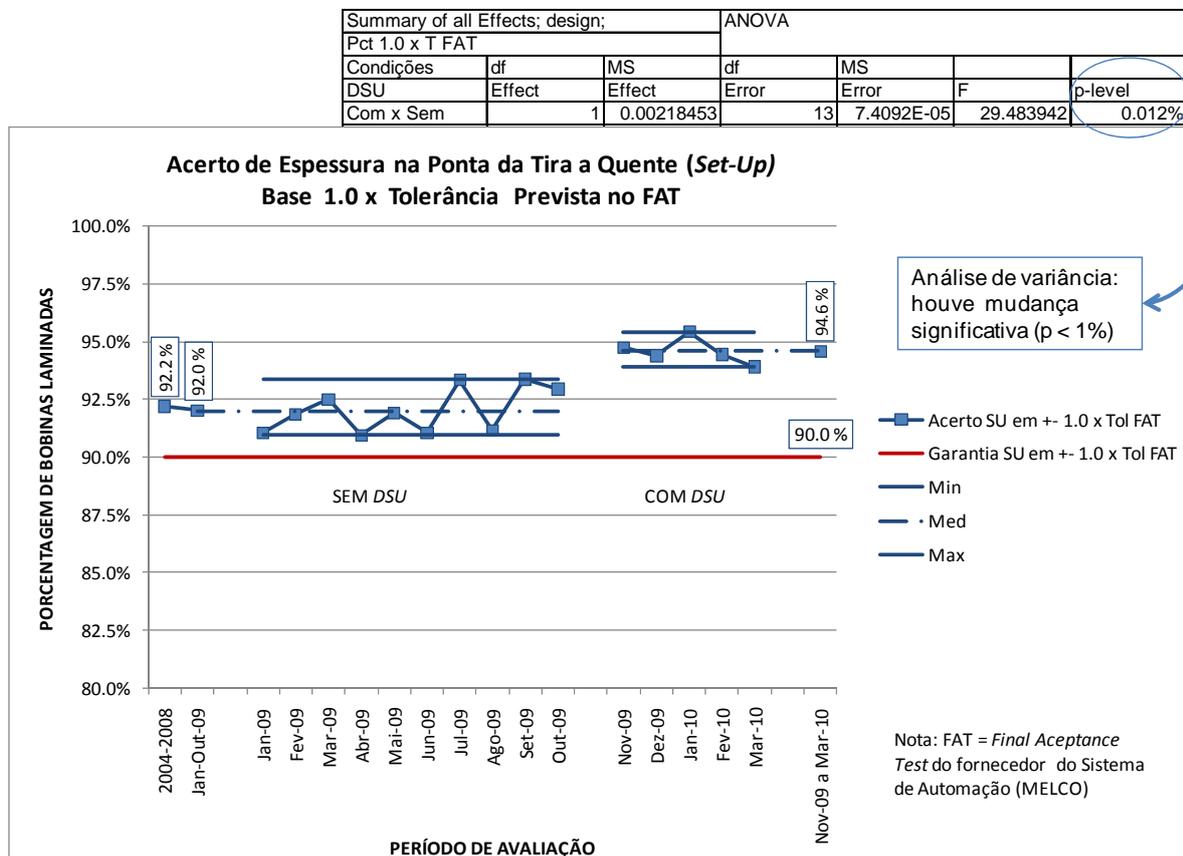


Figura 4. Gráfico de porcentagem de bobinas atendendo à garantia de acerto de espessura na ponta inicial da tira (região de *set-up*) dentro da tolerância especificada para condições controladas do teste final de aceitação (*FAT*) do sistema de automação. Os dados referem-se a condições usuais de produção de todas as bobinas produzidas. Nota-se um aumento do índice médio de acerto com a utilização da função de *set-up* dinâmico (*DSU*), confirmado pela análise de variância dos índices mensais.

Embora tenha causas múltiplas e complexas, o índice de sucata, mostrado na Figura 5, neste caso computado como peso relativo de bobinas acidentadas entre cadeiras do LTQ1 e na sua mesa de saída, nota-se que no período em que se passou a utilizar a função de *DSU*, houve redução expressiva do índice médio de sucatas e do seu grau de variabilidade. Ou seja, houve menor ocorrência de perda de material, danos ao laminador, menor perda de tempo de produção pela ocorrência desse tipo de problema, e maior previsibilidade do processo.

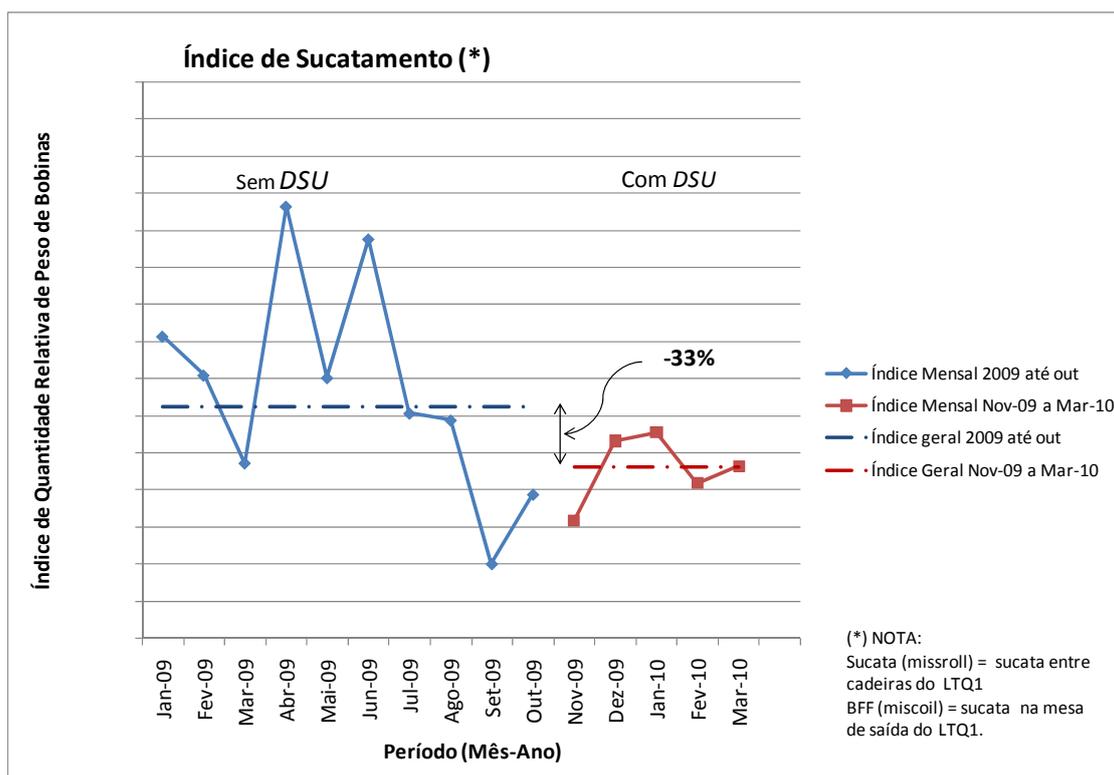


Figura 5. Gráfico do índice geral de sucata (sucata entre cadeiras + sucata de mesa de saída) do LTQ1, indicando menor índice de ocorrência no período com aplicação da função de correção dinâmica *DSU*.

4 CONCLUSÕES

O LTQ1 da Usiminas Cubatão conta com a função automática de correção dinâmica, *DSU*, do *set-up* prévio definido pelo seu modelo de *set-up FSU*, funcionando de forma contínua e estável.

A fundamentação teórica básica dessa função indicou sua dependência de fatores como os coeficientes de rigidez das cadeiras, coeficientes de plasticidade do material laminado, esquemas de espessuras entre cadeiras e forças de laminação previstas e reais registradas na ponta inicial da tira.

No período em que se passou a utilizar a função de *DSU*, foi obtida melhoria significativa e do acerto de espessura na região de *set-up*, ou ponta inicial da tira laminada a quente, simultaneamente a um aumento da estabilidade operacional, em termos da redução e menor dispersão do índice de sucata do laminador.

REFERÊNCIAS

- 1 MURAO, H.; SHIMODA, N.; WAKAMYIA, Y. *Finishing Mill Set-up Calculation (FSU)*. Manual reservado da Mitsubishi Electric Company, 1996-7-26. 138 p.
- 2 GINZBURG, VLADIMIR B. **Steel Rolling Technology**. New York : Editora Marcel Dekker, volume 30 de Manufacturing Engineering and Materials Processing, 1989, 791 p.
- 3 HELMAN, HORÁCIO; CETLIN, PAULO R. *Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1983, 179 p.
- 4 PLAUT, RONALD LESLEY. **Laminação dos Aços – Tópicos Avançados**. São Paulo: Editora da ABM Livros, 1986, 180 p.
- 5 TSELIKOV, A. **Stress and Strain in Metal Rolling**. Moscou: Editora MIR Publishers, 1967, 475 p.
- 6 TSELIKOV, A.; NIKITIN, G. S.; ROKOTYAN, S. E. **The Theory of Lengthwise Rolling**. Editora MIR Publishers, 1980, 342 p.
- 7 **ASTM A568 / A568M - 09a** Standard Specification for Steel, Sheet, Carbon, Structural, and High-Strength, Low-Alloy, Hot-Rolled and Cold-Rolled, General Requirements for.
- 8 **ASTM A635 / A635M - 09b** Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, Heavy-Thickness Coils, Hot-Rolled, Alloy, Carbon, Structural, High-Strength Low-Alloy, and High-Strength Low-Alloy with Improved Formability, General Requirements for.