

MELHORIA DOS RESULTADOS DE PLANICIDADE EM BOBINAS LAMINADAS A QUENTE NA CST ¹

Caetano Nunes da Silva ²
Aislan Francisco Leite da Costa ³
Eduardo Alves Machado ⁴
Cristina Maria O. Lima Roque ⁵
Vinicius dos Reis Carvalho ⁶
Henrique Del Caro Filho ⁷

Resumo

O Laminador de Tiras a Quente e o Laminador de Acabamento da Companhia Siderúrgica de Tubarão possuem avançadas tecnologias para a obtenção de bons resultados de planicidade, muito embora alguns materiais críticos apresentaram um histórico de problemas com ondulações durante o processamento pelos clientes. Diante deste quadro, a partir do segundo semestre de 2004 foi iniciado um amplo trabalho para a melhoria dos resultados de planicidade. O desenvolvimento deste trabalho iniciou-se com a caracterização das reclamações de clientes em 2004, seguida da implementação de diversas ações nos processos do Laminador de Tiras a Quente e do Laminador de Acabamento. A verificação da eficácia das ações implementadas vem mostrando uma evolução contínua do índice de acerto da planicidade medida na saída do trem acabador e uma acentuada queda no índice de reclamações de clientes por planicidade.

Palavras-chave: Planicidade; Laminação de tiras a quente; Laminação de acabamento.

¹ *Contribuição Técnica ao 42º Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Santos, SP, 25 a 28 de Outubro de 2005*

² *Engenheiro de materiais, Especialista em Laminação de Tiras a Quente da CST, Vitória, ES*

³ *Engenheiro metalurgista, MSc, Especialista em Laminação de Tiras a Quente da CST, Vitória, ES*

⁴ *Engenheiro metalurgista, Especialista da Assistência Técnica de Bobinas da CST, Vitória, ES*

⁵ *Engenheira mecânica, MSc, Especialista em Automação da CST, Vitória, ES*

⁶ *Engenheiro metalurgista, Especialista em Laminação de Tiras a Quente da CST, Vitória, ES*

⁷ *Engenheiro mecânico, Executivo de Vendas da CST, Vitória, ES*

1 INTRODUÇÃO

O complexo industrial de laminação de tiras a quente da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), inaugurado em 2002, apresenta o estado da arte em tecnologias de laminação a quente. Fruto de um investimento da ordem de US\$ 450 milhões, o Laminador de Tiras a Quente (LTQ) possui tecnologias que permitem a produção de laminados a quente de alta qualidade com espessuras variando entre 1,20 e 16,00mm e larguras entre 700 e 1.880mm. Com capacidade nominal para a produção de 2.000.000 t/ano de bobinas de aço, o complexo industrial do LTQ conta também com um Laminador de Acabamento (LA) para 750.000 t/ano. Nesta linha de rebobinamento é agregado valor ao produto final através da aplicação de um alongamento controlado para melhoria da planicidade e das propriedades mecânicas.

A planicidade dos produtos planos de aço é uma das propriedades mais percebidas pelos clientes e em geral um dos maiores motivos de reclamações. Considerando a forte atuação da CST no mercado de laminados a quente de baixa espessura para aplicação direta e a tendência de evolução nos requisitos de forma e planicidade, torna-se fundamental o domínio das variáveis de processo influentes na planicidade.

Definida por Ginzburg⁽¹⁾ como sendo “um parâmetro mensurável que descreve a presença de ondulações ou encurvamentos e suas posições e tamanhos ao longo do material”, a planicidade é especificada pelas principais normas técnicas de produtos laminados planos de aço, como a ASTM A568 e a NBR 11888. Os principais tipos de defeitos de planicidade estão representados na Figura 1.

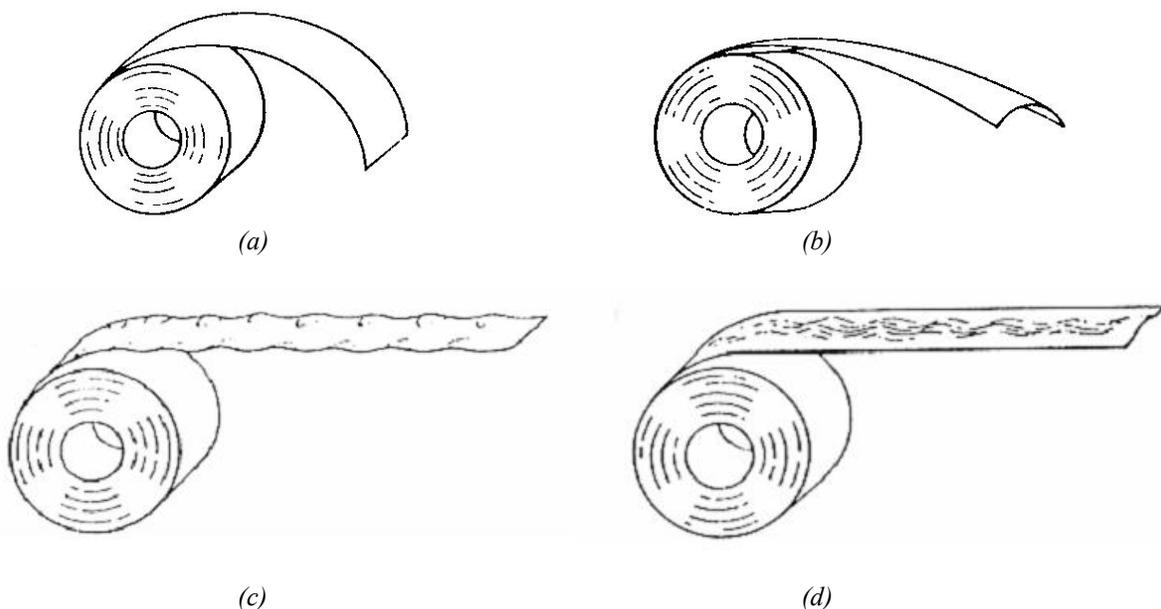


Figura 1. Defeitos de planicidade - encurvamento longitudinal (a), encurvamento transversal (b), ondulações de borda (c) e ondulações centrais (d). Fonte: Herr-Voss⁽²⁾.

Apesar de serem todos considerados defeitos de planicidade, as origens dos defeitos de encurvamento e de ondulação são bastante distintas. Neste trabalho serão tratados somente os defeitos de ondulação, por estes serem de correção mais difícil pelos clientes e por serem normalmente originários da condição de laminação da tira. Quanto aos defeitos de encurvamento, são originados nos processos de bobinamento, desbobinamento ou resfriamento da tira, sendo normalmente de fácil correção durante o processamento pelo cliente.

As ondulações são normalmente originadas da laminação diferenciada ao longo da largura da tira, conforme exemplificado na Figura 2, sendo que nas regiões com maior redução de espessura o comprimento do material é maior e se acomoda através da formação das ondulações.

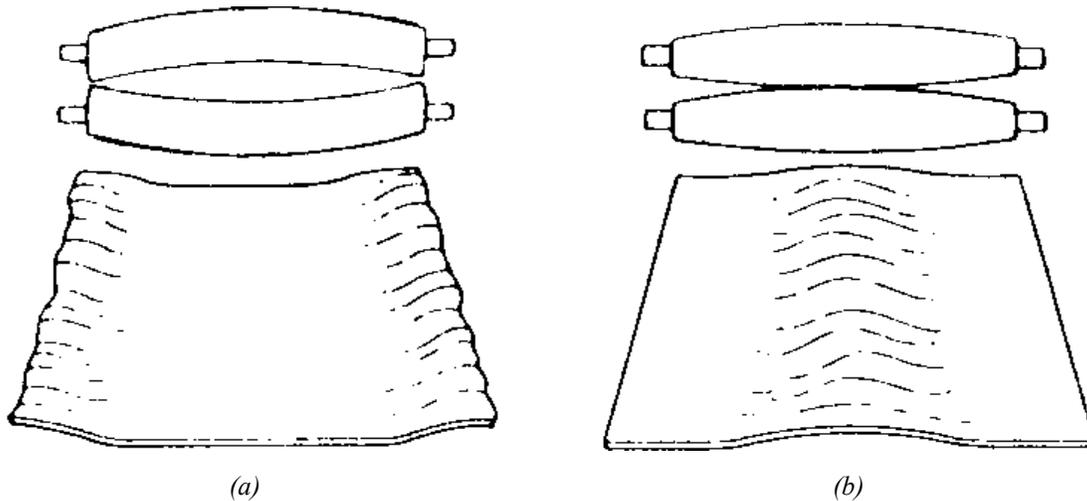


Figura 1. (a) Ondulações de borda causadas pela deformação excessiva dos cilindros e (b) ondulações centrais causadas pelo coroamento excessivo dos cilindros. Fonte: Herr-Voss(2).

A laminação diferenciada ao longo da largura está fortemente relacionada com o perfil transversal da tira laminada, representado de forma simplificada pela coroa (diferença de espessura do centro para a borda da tira). Assim sendo, variações na coroa relativa do material levam a formação de ondulações. As exceções, de acordo com Shigaki,⁽³⁾ são os materiais espessos, em que a deformação no sentido transversal permite uma certa variação da coroa relativa, conforme definido na equação abaixo e ilustrado pelo chamado “cone de forma” mostrado na Figura 3.

$$-80 \cdot \left(\frac{h_0}{w} \right)^{1,86} < \left(\frac{c_i}{h_i} - \frac{c_o}{h_o} \right) < 40 \cdot \left(\frac{h_0}{w} \right)^{1,86}$$

Onde C_i e C_o são as coroas antes e depois do passe de laminação, h_i e h_o são as espessuras antes e depois do passe de laminação e W é a largura da tira.

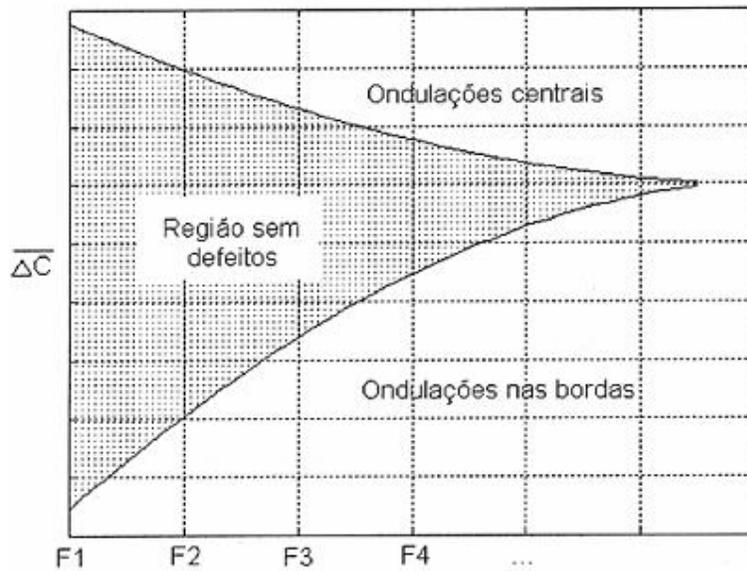


Figura 2. Cone de forma mostrando as variações permitíveis da coroa relativa (eixo Y) em função das cadeiras do trem acabador (eixo X). Fonte: Shigaki⁽³⁾.

Por fim, as ondulações porventura formadas durante a laminação a quente, podem ser eliminadas através do processamento a frio das bobinas em um laminador de acabamento, aplainadora ou desempenadeira. Nestes processos de correção da planicidade, a tira é submetida a alongamentos diferenciados ao longo da largura: maiores nas regiões sem ondulações e menores nas regiões onduladas.

As ações implementadas pela CST, a partir do segundo semestre de 2004, objetivaram a melhoria da planicidade final do produto laminado a quente, tendo abrangido tanto o processo de laminação no LTQ quanto o processo de correção da planicidade no LA. Na seqüência deste trabalho serão apresentados detalhes dos equipamentos, a caracterização dos problemas referentes à planicidade, o detalhamento das ações implementadas e finalmente os resultados obtidos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Descrição dos Equipamentos

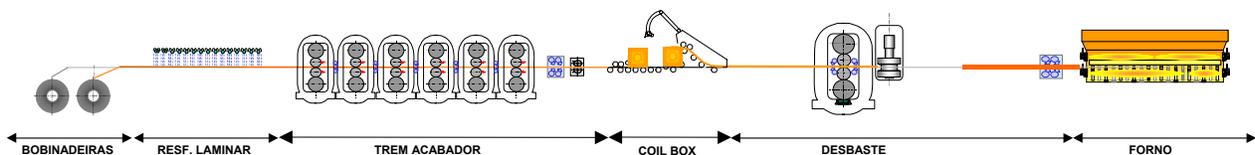


Figura 4. Lay-out do Laminador de Tiras a Quente da CST.

O LTQ da CST destaca-se por apresentar vários recursos que visam garantir a boa planicidade entre as cadeiras do trem acabador, o que, sem dúvida, proporciona também uma melhor planicidade na saída da cadeira F6. O trem acabador apresenta cilindros de contra-flexão (*bending* positivo) em todas as cadeiras com capacidade de até 1.500kN, o que associado ao *shifting* de $\pm 150\text{mm}$ e à curva do cilindros de trabalho com formato CVC (*continuous variable crown*), também em todas as cadeiras, permite uma grande flexibilidade à oficina de cilindros. O set-up de *shifting* e *bending* é calculado por um computador de processo, cujo modelo de controle (*PCFC - Profile Contour and Flatness Control*) se baseia principalmente na coroa térmica, desgaste e comportamento elástico dos cilindros de trabalho e encosto.

Essas tecnologias, quando utilizadas em conjunto com os medidores de planicidade existentes na linha, proporcionam também grande eficiência no controle da planicidade. O principal medidor da linha, que se baseia em raios-X e está localizado na saída do trem acabador, provê o *feed-back* para a correção da força de *bending* na última cadeira até que a ponta da tira alcance a bobinadeira. Os outros medidores existentes na linha são os *loopers* segmentados (*tensiometer loopers - TML*), entre as cadeiras F4/F5 e F5/F6, capazes de fazer a dupla função de *loopers* e de medidores de planicidade ao longo da largura da tira, permitindo com isso a correção automática do nivelamento e de ondulações simétricas.

Bobinas com dimensões críticas para a obtenção de bons resultados de planicidade no LTQ são reprocessadas no LA para a correção de possíveis ondulações. O LA da CST iniciou suas operações junto com o LTQ, sendo dotado de recursos tecnológicos de última geração como uma cadeira de laminação quádrupla com força máxima de 13.000kN, cilindros hidráulicos para controle da flexão dos cilindros (forças de *bending* positivas e negativas), medição e controle automático do alongamento.

2.2 Caracterização do Problema

Ao longo do período de evolução da produção do LTQ da CST, as parcerias desenvolvidas com os clientes foram essenciais não só para a conquista do mercado como também para a evolução da qualidade das bobinas da CST. Durante o processo de melhoria da planicidade, as inúmeras visitas aos clientes serviram como ampla fonte de informações que possibilitaram a caracterização do problema e orientaram a tomada de ações no processo.

Os problemas mais comuns enfrentados pelos clientes eram de ondulações de borda em materiais finos ($\leq 2,00\text{mm}$) e ondulações centrais em materiais largos ($\geq 1.300\text{mm}$), conforme ilustrado na Figura 5.

A estratificação das reclamações por planicidade mostrou que:

- ✓ 98% do peso reclamado foi aplicado para corte em chapas, que é uma aplicação crítica que evidencia as ocorrências de ondulações;
- ✓ 95% do peso reclamado tinha uma relação larg./esp. ≥ 580 , que caracteriza as dimensões críticas para a obtenção de uma boa planicidade;
- ✓ 94% do peso reclamado teve processamento no LA, evidenciando que nestes casos a correção da planicidade não estava sendo efetiva.



Figura 5. Fotos de bobinas relamadas por clientes com ondulações centrais (2,00 x 1.200 e com ondulações de borda (2,65 x 1.500mm), respectivamente

2.3 Ações no Laminador de Tiras a Quente

Durante a avaliação da planicidade no LTQ, foi possível observar que os resultados eram fortemente influenciados pela variação do *shifting*, principalmente nas três últimas cadeiras do trem acabador. Por dois meses seguidos, Junho e Julho de 2004, trabalhou-se com o *shifting* limitado em $\pm 50\text{mm}$, ao invés de $\pm 150\text{mm}$, nas cadeiras F5 e F6. Os resultados favoráveis observados serviram de base para a principal ação do grupo de assistência técnica para melhoria da planicidade, contratado junto à empresa SMS Demag nos meses de Setembro e Outubro de 2004. Esta assistência técnica contou com a participação de especialistas de processo e de automação, tendo sido feitas avaliações de vários parâmetros de processo, desde a uniformidade de temperatura no esboço até parâmetros do modelo de controle da planicidade (*Profile Contour and Flatness Control - PCFC*).

As principais ações tomadas a partir de então para a melhoria da planicidade no LTQ foram:

- ✓ Criação de função para permitir menor variação de *shifting* entre tiras similares, sobretudo em materiais finos.
- ✓ Aumento do tempo de permanência no forno de reaquecimento para materiais críticos para a obtenção de bons resultados de planicidade, melhorando a uniformidade de temperatura entre as superfícies e o núcleo das placas.
- ✓ Ajustes das definições de famílias dos aços no modelo de set-up de força do LTQ, de acordo com suas composições químicas.
- ✓ Ajustes de parâmetros de processo tais como: temperaturas de extração, temperaturas de entrada e saída do trem acabador e vazões de óleo por cadeira.
- ✓ Checagem do comportamento térmico dos cilindros de trabalho.
- ✓ Ajuste da função de controle de planicidade na cadeira F6, utilizando o feed-back do medidor de planicidade da saída do trem acabador.
- ✓ Reposicionamento de câmeras para gravação digital das imagens na saída do trem acabador e entrada das bobinadeiras, permitindo uma melhor visualização da ocorrência de ondulações.

2.4 Ações no Laminador de Acabamento

A análise do processamento no LA mostrou que a ineficácia na correção da planicidade neste equipamento se concentrava em dois grupos de bobinas com características distintas:

- ✓ Bobinas com dimensões críticas (espessura baixa e largura alta) cuja planicidade obtida no LTQ era ruim;
- ✓ Bobinas largas processadas no fim de campanha dos cilindros de trabalho do LA.

No primeiro caso, a fim de aumentar a capacidade de correção das ondulações no LA, os valores de alongamento visados foram aumentados, conforme exemplos mostrados na tabela seguinte.

Tabela 2. Alongamentos visados no Laminador de Acabamento (LA)

Dimensão:	Alongamento visado anterior:	Novo alongamento visado:
1,50 x 1.200 mm	0,70 %	1,00 %
3,00 x 1.500 mm	0,60 %	0,80 %

Já no caso dos problemas com as bobinas processadas no fim da campanha dos cilindros de trabalho do LA, foi feita uma avaliação dos perfis de desgaste dos cilindros. Ficou claramente identificada uma tendência de desgaste concentrado próximo às bordas da largura média laminada durante a campanha, conforme Figura 2, gerando um coroamento positivo no centro da mesa dos cilindros. Este coroamento resultava em uma tendência de formação de ondulações centrais em materiais estreitos, que podia ser compensada através da utilização de forças de flexão dos cilindros (bending negativo). No entanto, para materiais largos, a correção da planicidade não era efetiva.

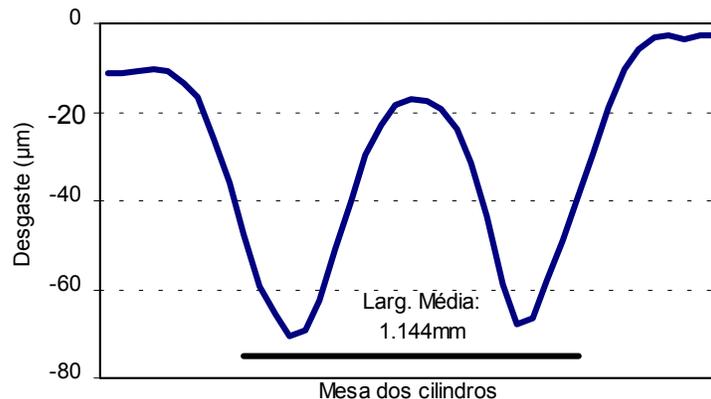


Figura 6. Exemplo de perfil de desgaste dos cilindros de trabalho (inferior + superior) do LA da CST após uma campanha de 326 km.

A partir da análise dos perfis de desgaste, foram revisados os critérios para o seqüenciamento das bobinas ao longo da campanha dos cilindros de trabalho do LA, ficando determinado que materiais largos ($\geq 1.300\text{mm}$) e materiais para aplicações com tolerâncias restritas de planicidade devem ser processados com cilindros que tenham laminado menos de 150 km.

3 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados de acerto da planicidade medida na saída do trem acabador, apresentados na Figura 7, demonstram uma evolução consistente resultante das ações de melhoria implementadas no LTQ.

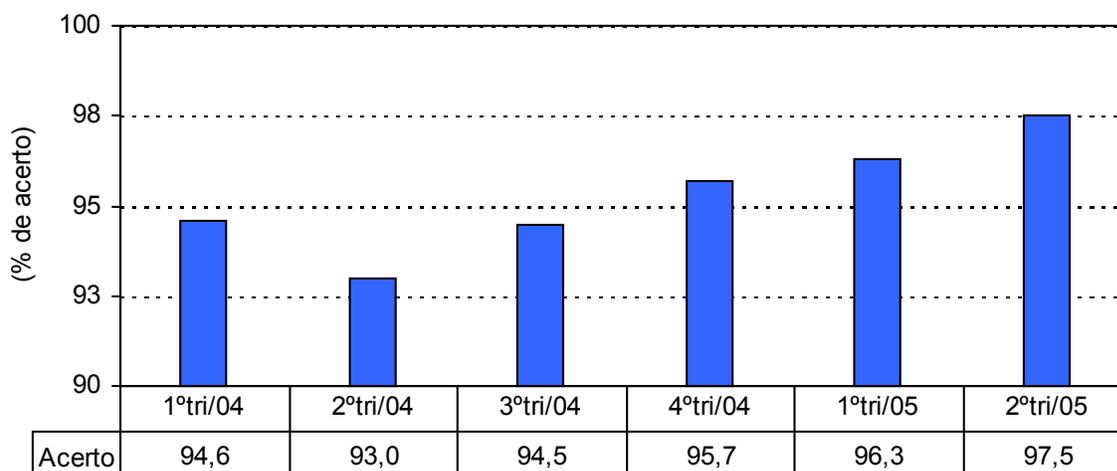


Figura 7. Evolução do índice de acerto da planicidade medida na saída do trem acabador por data de produção no LTQ.

Esta melhoria da planicidade no LTQ, combinada a uma maior efetividade na correção da planicidade em materiais críticos no LA, resultou em uma queda acentuada no índice de reclamação de clientes por planicidade ao longo do ano de 2004, conforme apresentado na Figura 8.

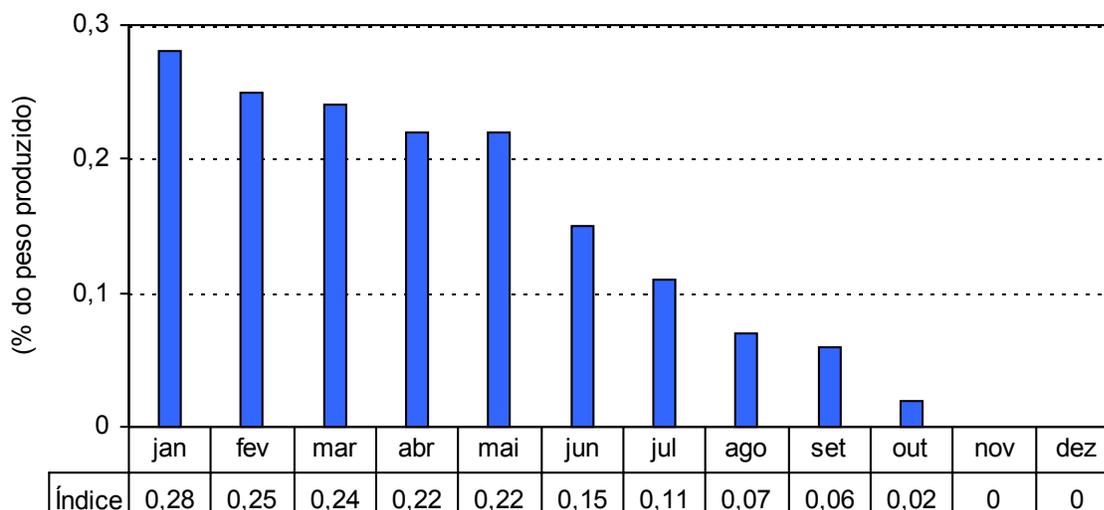


Figura 8. Evolução do índice de reclamações procedentes de clientes em 2004 por motivo de planicidade e por data de produção no LTQ

4 CONCLUSÕES

Graças às suas características tecnológicas, a vocação natural do LTQ da CST é a produção de tiras finas e com maior valor agregado. A produção de tiras finas é crítica no que se refere à obtenção de uma boa planicidade, tanto no processo de laminação no LTQ quanto no processo de correção da planicidade no LA.

Diversas ações para a melhoria da planicidade final do produto laminado a quente da CST foram implementadas a partir do segundo semestre de 2004, tendo-se obtido grande êxito, conforme visto nos resultados aqui apresentados. Complementarmente às ações implementadas nos processos de produção do LTQ e do LA, destaca-se a elevada capacitação técnica do pessoal envolvido nestes processos, o que garantiu a efetividade destas ações.

As experiências adquiridas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, permitiram não só significativos avanços nos processos de produção e nos resultados obtidos, como também consolidaram uma sólida base para um ciclo de melhoria contínua, que propiciará o atendimento aos requisitos de qualidade cada vez mais restritos exigidos pelo mercado.

REFERÊNCIAS

- 1 GINZBURG, V.B. Steel - rolling technology: theory and practice (Manufacturing engineering and materials processing ; 30). New York: Marcel Dekker Inc., 1989.
- 2 HERR-VOSS, The book on levelling, 2000.
- 3 SHIGAKI, Y.; CACCIOPPOLI, J.M.R. Análise da prática da distribuição homogênea de cargas em laminadores quádruplos. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 59., 2004, São Paulo. São Paulo: ABM, 2004.

IMPROVEMENT OF HOT ROLLED COIL'S FLATNESS RESULTS IN CST¹

Caetano Nunes da Silva²
Aislan Francisco Leite da Costa³
Eduardo Alves Machado⁴
Cristina Maria O. Lima Roque⁵
Vinicius dos Reis Carvalho⁶
Henrique Del Caro Filho⁷

Abstract

CST's Hot Strip Mill and Skin Pass Mill are provided with advanced technologies for flatness control, even though some critical materials have presented waviness problems during the customer's processing. Due to these problems, in the second semester of 2004 a large effort for flatness improvement has begun. The development of this work started with the characterization of the 2004 customer's claims, followed by several actions implemented in the Hot Strip Mill and Skin Pass Mill processes. The results are showing a continuous improvement of the flatness measured in the exit of the last stand and a pronounced decrease of the customer's claims for flatness.

Key words: Flatness; Hot strip mill; Skin pass mill.

¹ *Technical Contribution to 42nd Rolling Seminar: Processes and Rolled and Coated Products, October 25th to 28th, 2004 - Santos - SP*

² *Materials Engineer, CST's HSM Specialist Engineer, Vitória, ES*

³ *Metallurgical Engineer, M.Sc, CST's HSM Specialist Engineer, Vitória, ES*

⁴ *Metallurgical Engineer, CST's Technical Assistance Engineer, Vitória, ES*

⁵ *Mechanical Engineer, M.Sc, CST's Automation Specialist Engineer, Vitória, ES*

⁶ *Metallurgical Engineer, CST's HSM Specialist Engineer, Vitória, ES*

⁷ *Mechanical Engineer, CST's Sales Executive, Vitória, ES*