

ADEQUAÇÃO DE PROCESSO VISANDO AUMENTO DE PRODUTIVIDADE NAS LINHAS DE DECAPAGEM CONTÍNUA DA CSN¹

Alexandre Lorandes²
Anderson Alves da Silva³
Cleverson Roberto Godinho⁴
Leandro Oliveira Martins⁵
Leiner Novaes Arêdes⁶
Marcelo Geraldo Rocha Milagres²
Marcelo Vilela Moreira²
Renata Garcez⁷
Verner Wolfram Wolgien²
Willian Costa do Nascimento²

Resumo

Projetos tem sido implementados através do redesenho do processo no fluxo produtivo. A demanda por aços planos com especificações cada vez mais restritivas impactam em diferentes escalas na produtividade das linhas de produção. Em especial a produtividade das linhas de decapagem da CSN têm sido afetadas pela maior participação da empresa no mercado automotivo. O trabalho descreve ações integradas realizadas pela equipe com intuito de neutralizar as perdas de produção sem gerar prejuízo às características dos produtos. As ações envolveram alterações e ajustes nos parâmetros de processo, em especial na temperatura de bobinamento e taxas de redução a frio. As etapas de análise, planejamento, desenvolvimento, implementação e os resultados obtidos são apresentados no trabalho.

Palavras chaves: Produtividade; Decapagens; Processo.

PROCESS ADJUSTMENT IN ORDER TO INCREASE THE PRODUCTIVITY IN THE CONTINUOUS PICKLING LINES OF CSN

Abstract

Projects have recently been implemented by redesigning the production flow process. The demand for flat steel products with specific characteristics, have in many cases reducing the line's productivity. In particular the continuous pickling lines of CSN have been affected. This paper describes the changes made in the thickness and temperature of the hot rolling process without damage of product characteristics. The process analysis, planning, development to implementation of the changes and results are shown in this work.

Key words: Productivity; Continuous pickling lines; Process.

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

² Engenheiro Metalúrgico da CSN;

³ Técnico de Eletromecânica da CSN;

⁴ Engenheiro Mecânico da CSN;

⁵ Engenheiro de Produção da CSN;

⁶ Engenheiro Metalúrgico da CSN, MSc

⁷ Metalúrgica da CSN. MSc;

1 INTRODUÇÃO

No ano de 2007 a Companhia Siderúrgica Nacional com sua unidade de produção de aços planos localizada na cidade de Volta Redonda - RJ retomou de forma consistente o fornecimento de aços destinados ao mercado que atende a indústria automotiva.

Para estes materiais produzidos via Linhas de Recozimento Contínuo se faz necessário, no processo de laminação a quente, temperaturas de acabamento e bobinamento mais altas para obter um alto grau de estampabilidade e atender as propriedades mecânicas requeridas. Da mesma forma os produtos revestidos destinados ao mercado de embalagens, “folha de *flandres*” tem recentemente exigido características mecânicas que atendam os processos de estampagem que cada vez mais apresentam formas com maior grau de complexidade.

No processo de laminação a quente temos a influência da temperatura de acabamento (TA), da temperatura de bobinamento (TB) e da taxa de resfriamento na formação da carepa. Temperaturas de acabamento e bobinamento altas contribuem para a formação de uma carepa de mais difícil remoção, diminuindo a produtividade das linhas de decapagem. A TA influencia na espessura da camada de óxido e a TB, influencia na espessura e no tipo de óxido formado.^(1,2)

Segundo Chen e Yuen,⁽³⁾ a TA, controla o crescimento da camada de óxido (carepa) no interior da bobina. Quanto maior a TA, maior a espessura da carepa. No mecanismo de ataque do ácido clorídrico à carepa, destaca-se o fato de que a fase menos oxidada (FeO) sofre um ataque com maior intensidade.⁽³⁻⁵⁾

Assim, o ácido penetra nas fissuras causadas pelos rolos quebradores de carepa que atuam na tira mediante um processo de dobramento, anterior aos tanques de ácido, permitindo o acesso do ácido à camada mais interna e mais solúvel (FeO), e as camadas externas mais oxidadas (Fe₂O₃ e Fe₃O₄) são removidas. Temperaturas elevadas de bobinamento como, por exemplo, acima de 730°C aumentam a espessura da carepa e modificam sua composição.

Para atender a demanda crescente de materiais de alta estampabilidade, o processo de laminação a quente define as temperaturas de processo de forma a atender as propriedades mecânicas requeridas, mas que afetam a produtividade das linhas de decapagem contínuas (LDC's) por serem aços que necessitam de um maior tempo de processamento nos tanques de ácido clorídrico das linhas de decapagem contínua da CSN-VR para a total remoção da camada de óxidos da tira laminada a quente.

Para atendimento aos volumes de produção que foram retomados após a crise econômica mundial (2008/2009), surgiu a necessidade de buscar alternativas para recuperar as perdas de produtividade geradas principalmente pelo aumento de materiais com temperatura de bobinamento alta (TBA). Vários trabalhos têm sido desenvolvidos nas LDC's para aumento do tempo disponível para produzir, atuando em melhorias operacionais e de manutenção, porém muitas destas ações são de médio e longo prazo criando uma necessidade de buscar soluções de curto prazo. Após um criterioso levantamento dos materiais produzidos nas LDC's que têm a produtividade reduzida devido a determinadas características de processo e de produto, o grupo de trabalho atuou em diferentes “frentes”, propondo alternativas que promovessem ganhos de produção nas LDC's, atuando de forma a analisar quais produtos poderiam ter suas variáveis de processo/produto alteradas, sem gerar efeitos indesejáveis significativos aos equipamentos/processos e ao cliente final. A seguir serão apresentados os materiais definidos para testes, as variáveis de

processo/produto selecionadas, as alterações propostas e os resultados obtidos em relação aos ganhos de produtividade das LDC's.

A Figura 1 apresenta o *layout* da linha de decapagem contínua da CSN – VR.

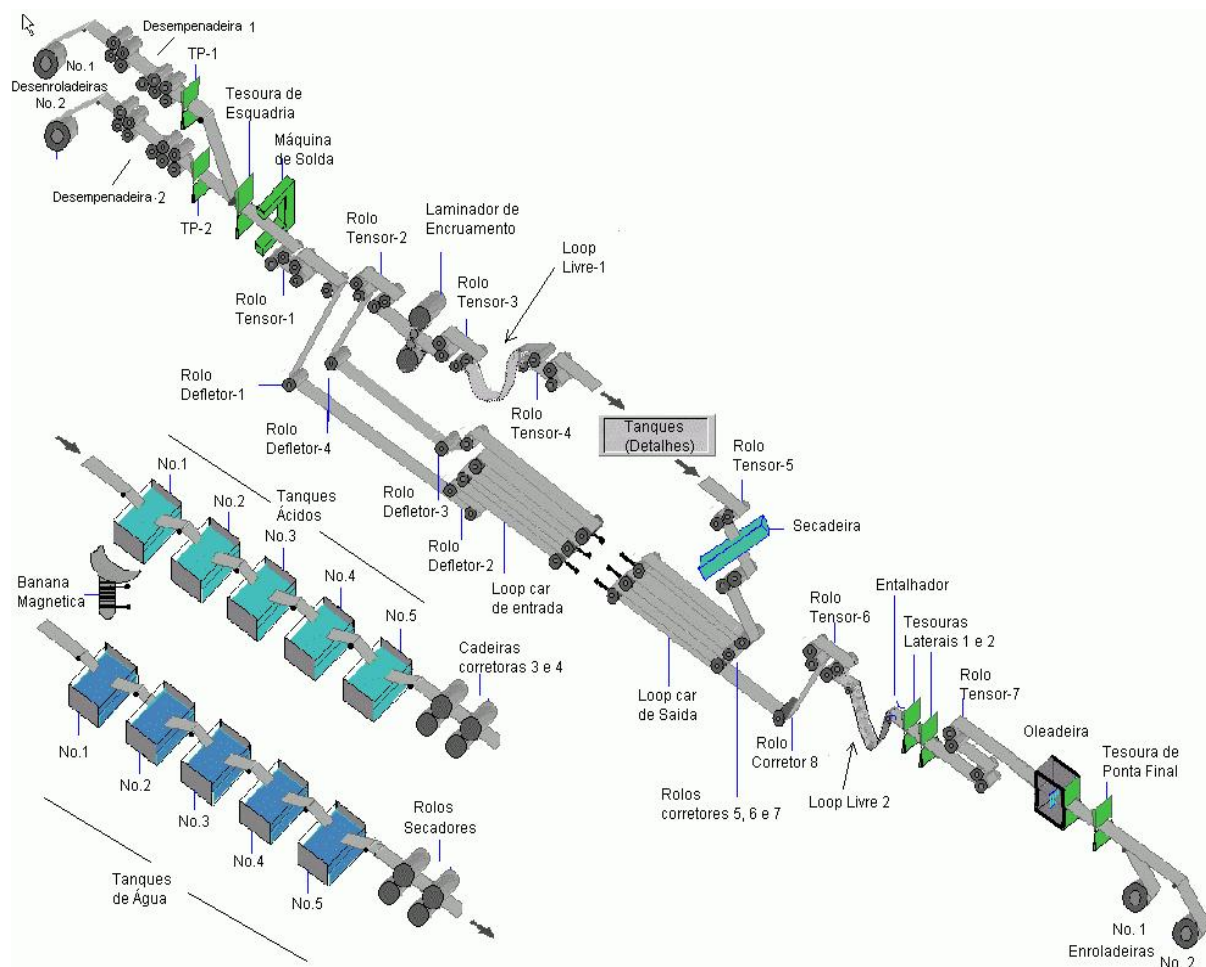


Figura 1. *Layout* da linha de decapagem contínua da CSN-VR.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Após análise das alternativas para aumento da produtividade das LDC's, foram definidas as variáveis a serem testadas e as alterações de processo/produto propostas, sendo elas:

- redução da temperatura de bobinamento (TB) na laminação a quente;
- aumento da espessura laminada a quente; e
- borda na decapagem: de aparada para natural.

2.1 Redução da Temperatura de Bobinamento na Laminação a Quente

A temperatura de bobinamento, durante o processamento da tira de aço no laminador de tiras a quente, é uma variável de processo que influencia diretamente nas propriedades mecânicas da tira laminada. Porém, valores crescentes da temperatura de bobinamento estão diretamente relacionados ao aumento da espessura da camada de hematita (Fe_2O_3) que se forma na superfície do material⁽⁶⁾ (Figura 2), fato que contribui para a necessidade de redução de velocidade nas LDC's com a finalidade de facilitar sua decapabilidade 1.

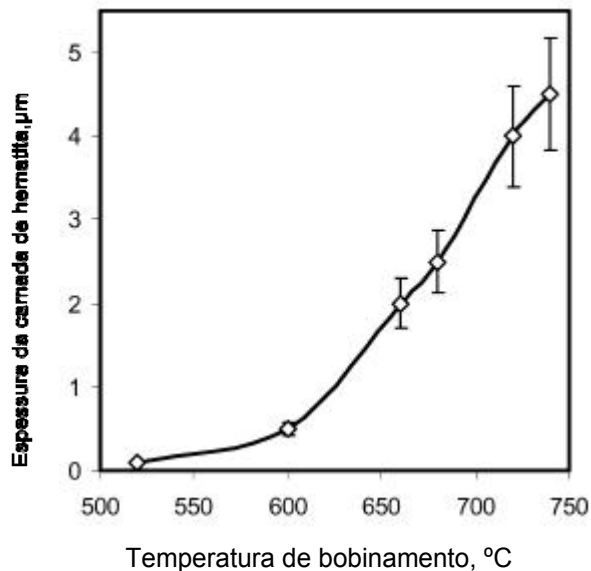


Figura 2. Espessura da camada de hematita nas regiões da borda em função da temperatura de bobinação da tira.⁽⁶⁾

A Tabela 1 apresenta, em valores percentuais, as perdas de produtividade nas linhas de decapagem contínua da CSN, em função das faixas de temperatura de bobinação alta na laminação a quente. Os materiais produzidos com temperaturas de bobinação acima de 680°C promovem perdas significativas de produção nas LDC's (faixas 3 e 4). Foi então analisada a possibilidade de uma adequação dos padrões atuais praticados. Ao longo dos últimos anos os materiais produzidos com temperatura de bobinação alta (TBA) vêm aumentando, e em 2009 este valor chegou a 33,4% de todo material produzido nas LDC's.

Tabela 1. Perda de produtividade das LDC's da CSN-VR em função da temperatura de bobinação alta (TBA)

Faixa	Temperatura de bobinação (°C) (TB)	Perda de Produtividade LDC's (%)
1	≤ 650	0
2	< 680	5
3	≥ 680	12
4	> 700	26

Neste trabalho, as alterações nas faixas de TB foram realizadas em materiais de estampagem média que se encontravam dentro das faixas 3 e 4 (TBA). Como premissas básicas, foram excluídos dos testes materiais que atendam aos usos destinados à estampagem profunda.

Não houve alteração de outras variáveis de processo em conjunto com a redução da TB. Foram avaliadas em todos os fluxos de produção (folhas de *flandres*, linha a frio e zincados) as especificações possíveis de serem testadas com a alteração das faixas de temperatura de bobinação e que poderiam ter aplicação em outras especificações de forma a minimizar riscos e custos. Em todos os casos os materiais foram processados em linhas de recozimento contínuo.

2.1.1 Redução da temperatura de bobinamento – material galvanizado

A Figura 3 mostra a estratificação dos dados de aços galvanizados produzidos com TB na faixa 4. A maioria dos materiais TBA pertence à especificação NBR 7008 ZE, grau de estampagem média. Nesta especificação foi alterada a TB da faixa 4 para faixa 3 (Tabela 1). Na etapa de testes foram produzidas 67 bobinas nesta condição visando verificar os efeitos da alteração no produto final (propriedades mecânicas) e no processo (ganho de produtividade nas LDC's).

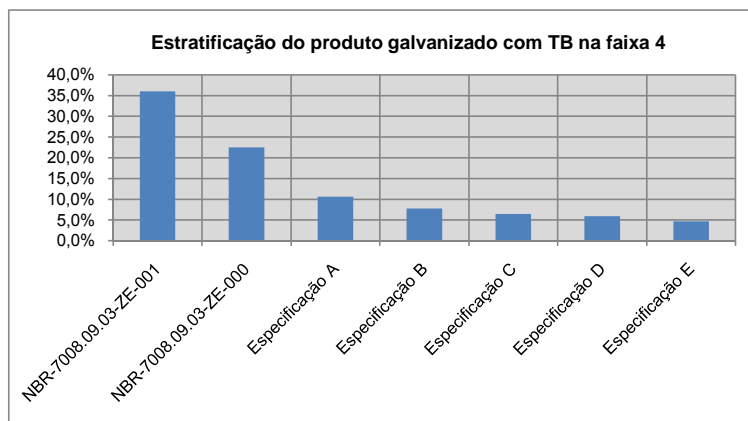


Figura 3. Estratificação de materiais galvanizados com TB na faixa 4.

2.1.2 Redução da temperatura de bobinamento – material folhas de *flandres*

As especificações de folhas de *flandres* que utilizam TB acima de 680°C (faixa 3) são utilizadas em aplicação específica para uso em latas expandidas. Com isto foi necessário um conhecimento prévio destas expansões para a determinação das faixas de propriedades mecânicas, pois com a redução da TB tender-se-ia a ter um aumento no limite de escoamento do aço.

A especificação CSN/LEX-TH390 (espessura a quente 2,40 mm para 0,20 mm de espessura a frio), foi a escolhida para o teste, pois representa cerca de 80% dos materiais TBA no fluxo de produção de folhas de *flandres*.

Foram realizados testes em 27 bobinas desta especificação.

Da mesma forma foram avaliadas a produtividade nas LDC's e as propriedades mecânicas no produto final.

2.1.3 Redução da temperatura de bobinamento – material laminado a frio

Conforme podemos observar na Figura 4, a especificação com maior volume de produção de laminado a frio produzido via recozimento contínuo que apresentava TB na faixa 4 era a especificação CSN TP. Como esta especificação é da classe de material de estampagem profunda, optou-se por não testá-la. Logo, foi testada a segunda especificação com maior volume de laminados a frio produzidos com TB na faixa 4, a NBR 5915 EM.



Figura 4. Estratificação de materiais laminados a frio com TB na faixa 4.

Foram produzidas na etapa de teste 40 bobinas de material com TB da faixa 4 para faixa 3. Os dados analisados como resposta aos testes foram referentes à velocidade de processamento na linha de decapagem e propriedades mecânicas.

2.2 Borda na Decapagem: de Aparada para Natural

Uma variável que também afeta a produtividade das LDC's é o processo de aparamento lateral. Este aparamento é realizado com o objetivo de eliminar defeitos de borda, evitando possíveis arrebatamentos na laminação a frio e também atender as especificações de largura do material. Durante o processo de corte lateral ocorrem situações inerentes a operação de corte fazendo com que se tenha uma perda de produtividade em torno de 5% em relação ao mesmo material com borda natural. O maior benefício de não se aparar é o ganho em rendimento metálico que representa cerca de 2% em peso das perdas totais de rendimento o que no caso de materiais com borda natural se reflete em acréscimo de produção na saída das LDC's.

Após avaliação das tolerâncias finais dos produtos laminados a frio e zincados percebeu-se uma grande oportunidade de eliminar a sucata por aparar lateral. Muitos materiais apresentavam tolerâncias de largura final maiores ou iguais a 20 mm, que poderiam ser atendidas sem a necessidade de aparamento. Desta forma foram selecionados materiais para teste, inicialmente com espessuras a frio maiores para evitar riscos de arrebatamentos no laminador de tiras a frio nº 3.

Os riscos de arrebatamento são em função dos defeitos de borda gerados durante a laminação a quente e principalmente no manuseio das bobinas entre a laminação a quente e a decapagem. O armazenamento de bobinas anterior as linhas de decapagem se faz empilhando as mesmas no eixo vertical, o que contribui para os danos às bordas. Como as alterações nas condições de estocagem requerem alterações de projeto no longo prazo, ao longo dos anos de 2008 a 2011, foram testados materiais com borda natural nas espessuras a quente de 3,90 mm, 3,50 mm e 3,00 mm para laminar a frio nas espessuras de 1,50 mm, 1,20 mm, 0,90 mm, 0,75 mm e 0,60 mm. Foram considerados apenas materiais cuja tolerância de largura absorvesse as variações de largura dos processos de laminação a quente e a frio obtendo um produto com largura conforme. Foi necessário trabalhar com maior rigor na inspeção da borda nas LDC's, segregando os materiais com defeitos

de intensidade mais forte para posterior esmerilhamento dos referidos trechos, de forma a eliminar entalhes gerados pelos danos de manuseio. Foram registrados com fotos os defeitos de borda antes e após laminação a frio para avaliação da condição da borda e validação dos testes.

O objetivo foi encontrar a menor espessura laminada a frio na qual se poderia não aparar lateralmente o material nas LDC's e com baixo risco de arrebatamento durante a laminação a frio.

2.3 Aumento da Espessura Laminada a Quente

Os 3 laminadores a frio da CSN-VR são equipamentos utilizados para redução da espessura de bobinas a quente decapadas. São constituídos por 5 cadeiras de laminação, não reversíveis, *four high*. O aumento da espessura a quente em materiais que serão laminados a frio é uma boa alternativa para ganho de produtividade, principalmente das linhas de decapagem contínua em função da redução do tempo de processamento do material devido ao menor comprimento da tira considerando-se o mesmo peso e largura. O aumento da espessura a quente é proporcional ao aumento da redução total atribuída ao material, causando assim algumas implicações metalúrgicas importantes no que diz respeito à energia interna atribuída ao material, a qual é utilizada como força motriz em processos de recristalização⁽⁷⁾ realizados após a conformação a frio. Deste modo o aumento da taxa de redução a frio têm sido conduzido com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas: limite de escoamento, limite de resistência, dureza etc. As implicações mecânicas no laminador⁽⁸⁾ e o resultado da forma final ou planicidade do material laminado a frio podem ser impeditivos para implantação de qualquer alteração na taxa de redução total. Com relação às implicações mecânicas o aumento da redução total possui uma relação direta com as cargas na laminação a frio de cada cadeira, gerando um aumento das correntes dos motores acionadores e potências necessárias ao processo.

Desta maneira foi necessário a realização de simulação *off line* das possíveis oportunidades de alteração da espessura a quente através do modelo HHT desenvolvido pela Hitachi e adaptado para as condições dos laminadores a frio da CSN. Foram realizadas simulações não mostradas neste trabalho de forma a verificar a capacidade e possibilidade de alteração, sendo: Alteração na espessura a quente de 2,4 mm para 2,7 mm e 2,7 mm para 3,0 mm, com espessuras finais variando de 0,40 mm a 0,63 mm.

Nas Figuras 5 e 6 temos como exemplo os resultados da simulação realizada na alteração de 2,40 mm para 2,70 mm, mantendo-se constante a velocidade de processo. As correntes e potências obtidas na simulação além de fornecer segurança operacional ao equipamento, forneceram também os valores de referência das reduções por cadeira a serem utilizadas no desenvolvimento. A forma final da tira a frio está relacionada com a deflexão que sofrerá o cilindro de trabalho em função do aumento da carga de laminação a ser aplicada. Esta deflexão causará uma redução diferencial ao longo da seção transversal do material podendo vir a ocasionar defeitos de planicidade, denominados repuxados laterais ou centrais. Como não foi encontrado na literatura modelo capaz de prever a planicidade do material laminado a frio, esta foi avaliada através das cartas gráficas obtidas e no processamento das bobinas teste nas linhas contínuas posteriores.

Para o desenvolvimento foi estabelecido como premissas:

- alteração em aços de baixa resistência a conformação a frio; e
- taxa de redução total menor ou igual a 88,75%, conforme Equação 1.

$$\text{Redução \%} = ((e1 - e2) / e1) \times 100 \quad (1)$$

Onde:

- e1 = espessura de entrada;
- e2 = espessura de saída.

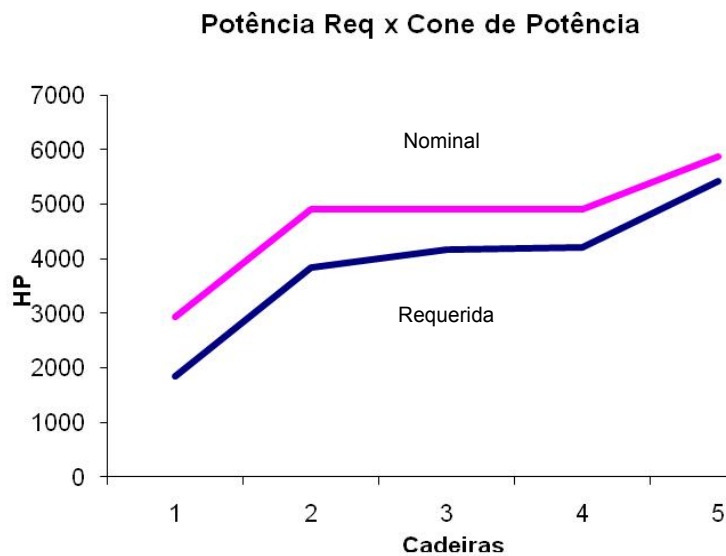


Figura 5. Potência e corrente dos motores nominal x requerida.

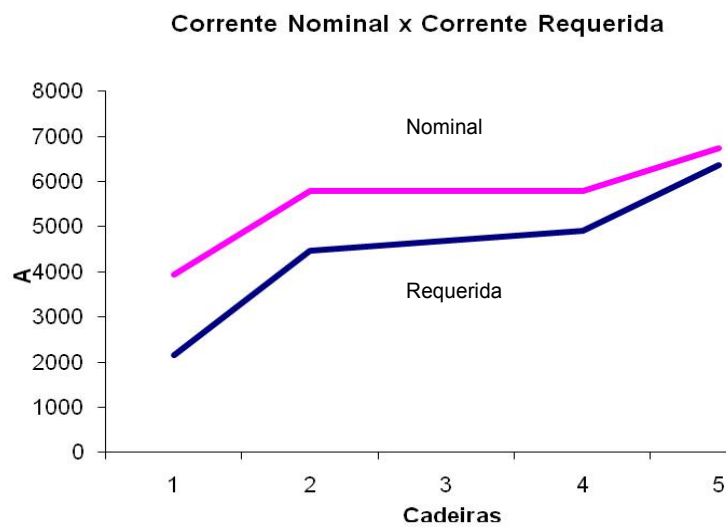


Figura 6. Potência e Corrente dos motores nominal x requerida.

3 RESULTADOS

3.1 Redução da Temperatura de Bobinamento na Laminação a Quente

3.1.1 Material galvanizado

Após os testes obteve-se um ganho aproximado de 15% no aumento da produtividade das linhas de decapagem comparado ao material produzido nas mesmas dimensões com a TB da faixa 4. Em função do volume produzido nesta especificação gerou-se uma disponibilidade de tempo para produzir. Como a produção de um determinado tipo de material é dependente das condições de mercado, considerou-se que com o tempo disponível gerado pelo aumento da produtividade poderia ser produzido qualquer tipo de produto do seu mix (laminado a frio, folha de flandres, galvanizado e até mesmo bobina decapada). Logo, trabalhando com uma produtividade média de 180 t/hora o ganho de produção nas linhas de decapagem ao reduzir a temperatura de bobinamento da especificação NBR 7008 ZE da faixa 4 para faixa 3 foi em torno de 800 t/mês.

A Figura 7 apresenta os valores de limite de escoamento do material antes (faixa 4) e após a alteração (faixa 3). Observa-se um deslocamento dos valores do limite de escoamento para o limite superior (300 MPa). A média aumentou cerca de 15 MPa. Porém, os valores encontrados se encontram dentro dos limites de especificação, não tendo ocorrido desvios internos e reclamações externas por propriedades fora dos limites desde a implementação da alteração os quais são monitorados.

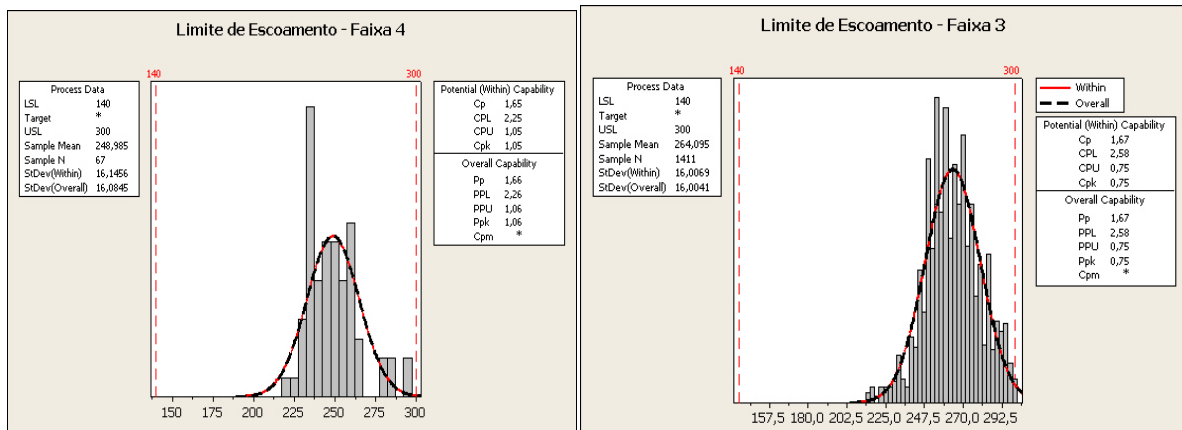


Figura 7. Limite de escoamento antes (faixa 4) e depois do teste (faixa 3).

3.1.2 Material folha de flandres

Conforme histograma mostrado na Figura 8, tivemos um ligeiro aumento na média de limite de escoamento (3 MPa). As demais propriedades mecânicas como limite de resistência, alongamento e dureza não tiveram alterações significativas quando da alteração da faixa. Este pequeno acréscimo não afetou as faixas de propriedades mecânicas especificadas. Após alteração da faixa, os materiais produzidos nas LDC's nesta especificação tiveram um acréscimo de aproximadamente 12% na produtividade proporcionando nas LDC's um ganho previsto de 200 t/mês considerando o volume médio produzido nesta especificação.

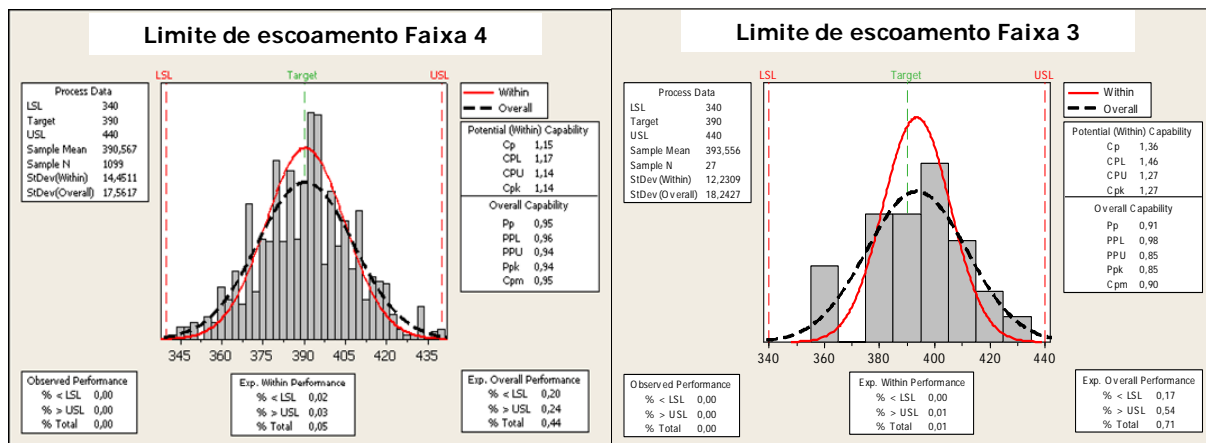


Figura 8. Limite de escoamento antes (faixa 4) e depois do teste (faixa 3).

3.1.3 Material laminado a frio

O ganho encontrado de aumento de produtividade foi de 15%. Considerando o volume médio atual produzido de material da especificação NBR 5915 EM, obteve-se um ganho de 170 t/mês.

Como resposta as mudanças de temperatura de bobinamento da faixa 4 para a faixa 3, a Figura 9 apresenta a variação do limite de escoamento do material para as condições de temperatura de bobinamento alta e na nova condição (redução da TB). As outras propriedades do material, tais como dureza e alongamento, também se mantiveram dentro dos limites especificados.

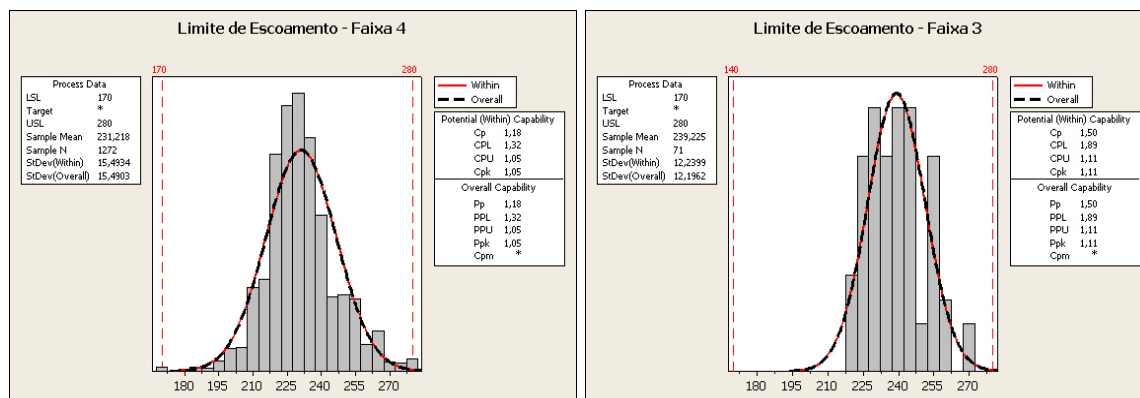


Figura 9. Capacidade antes (faixa 4) e depois do teste (faixa 3).

Houve um pequeno deslocamento da média do limite de escoamento do material em estudo, porém, mantendo a capacidade do processo. Vale enfatizar que nenhuma alteração no processo de recozimento foi realizada em conjunto com a alteração de temperatura de bobinamento. Após etapa de teste e avaliação dos resultados foi padronizada a nova faixa de TB.

3.2 Borda Natural na Decapagem

Após o processamento de 120 bobinas em diferentes espessuras a frio em materiais com borda natural, obteve-se total êxito em relação ao atendimento das larguras finais especificadas. O rompimento de tiras no laminador a frio nº 3 por problemas relacionados à borda se manteve em níveis inferiores a 100 PPM. Desta forma foram alteradas as novas regras para os materiais que se enquadravam nas condições de tolerâncias finais de largura maior ou igual a 20 mm retirando a

obrigatoriedade de aparamento. Houve um aumento de 17% da participação de materiais com borda natural em substituição a borda aparada no fluxo linha a frio e zincado no período de 2008 a 2011. Este aumento proporcionou um ganho de produção de 400 t/mês considerando o aumento de produtividade de 5% em materiais de borda natural e os volumes médios de produção que foram migrados para esta nova condição.

3.2 Aumento da Espessura Laminada a Quente

A planicidade de uma das bobinas de teste processadas é mostrada na Figura 10.

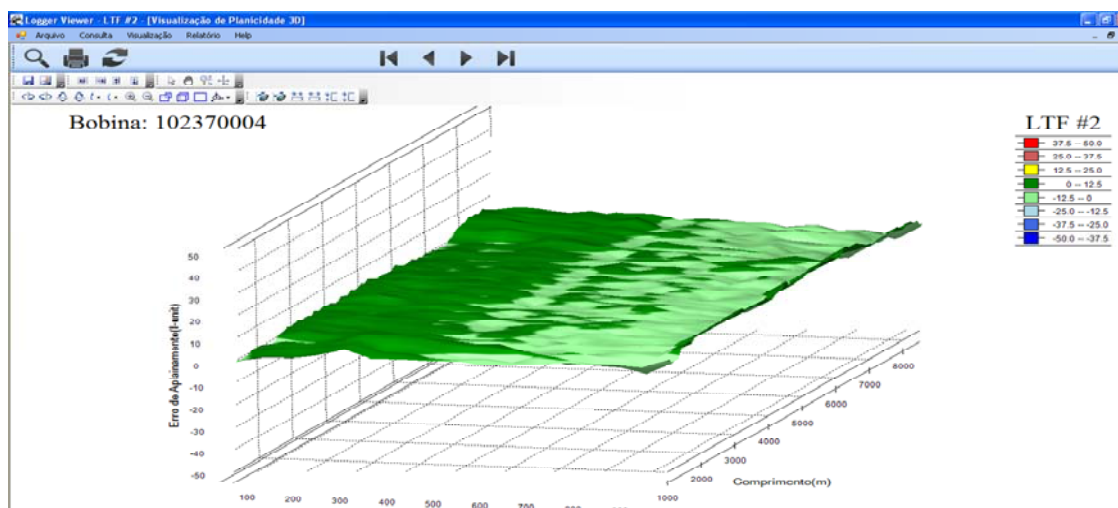


Figura 10. Planicidade em 2D do material laminado com esp. a quente alterada.

O resultado obtido é compatível com materiais com planicidade adequada para posterior processamento.

Outra preocupação importante não descrita anteriormente está relacionada com uma possível alteração da dureza obtida em virtude do refino dos grãos do material, devido à maior energia interna fornecida com o aumento da taxa de redução total. Como pode ser visualizado nas Figuras 11 e 12 houve pequena alteração nos valores de Cpk, porém dentro dos limites de especificação.

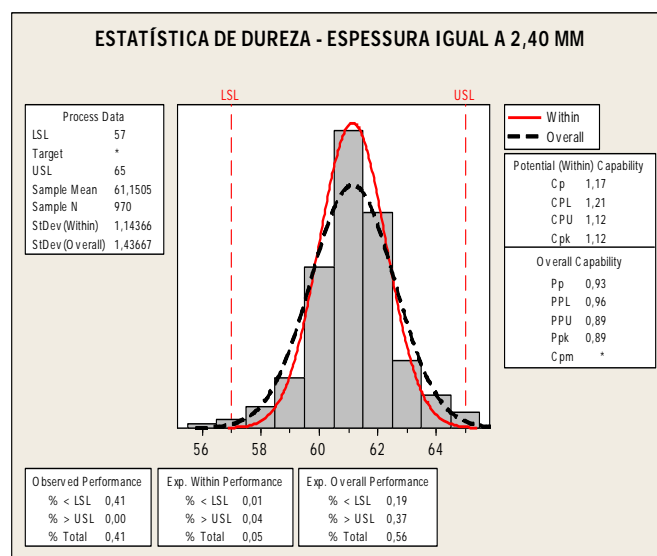


Figura 11. Durezas para espessura a quente 2,40 mm e 2,70 mm.

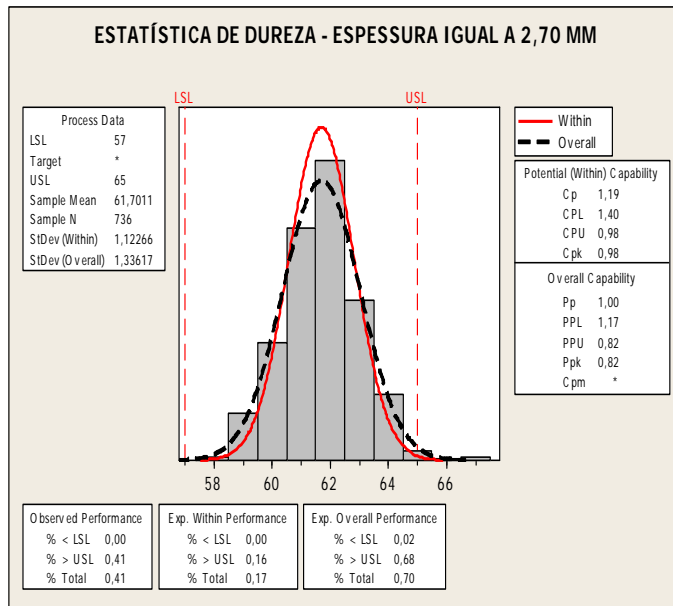


Figura 12. Durezas para espessura a quente 2,40 mm e 2,70 mm.

As Figuras 13 e 14 mostram os resultados reais de carga de laminação e velocidade de processo no laminador de tiras a frio nº 2, onde, é visualizado um aumento esperado da carga de laminação a frio e uma redução de aproximadamente 5% da velocidade de processo com fins a reduzir a corrente dos motores acionadores. Apesar da perda de produtividade no laminador a frio de aproximadamente 4%, o saldo final foi positivo visando o objetivo proposto no trabalho.

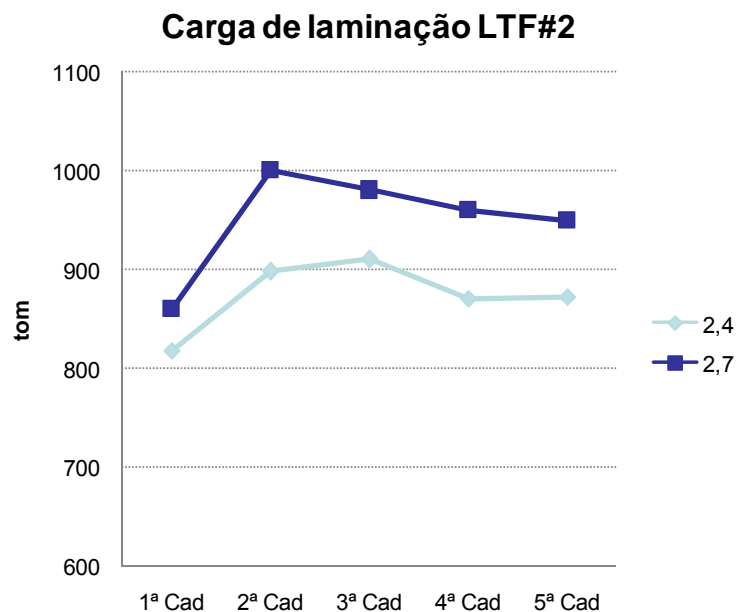


Figura 13. Carga de laminação e velocidade de processo.

**Velocidade média (mpm) da 5ª cadeira
no LTF#2**

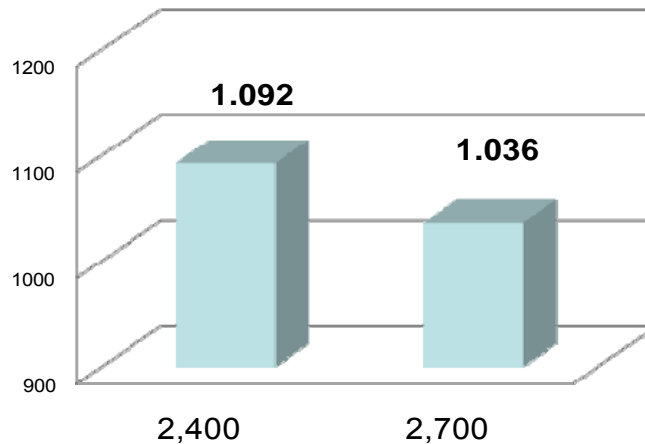


Figura 14. Carga de laminação e velocidade de processo.

Os resultados do desenvolvimento aqui mostrados representam em valores absolutos as maiores solicitações seja mecânica ou de forma. As outras alterações na espessura a quente propostas e implementadas são de valores de redução total menores que a registrada nesse trabalho sendo utilizado a mesma metodologia de simulação, avaliação e implementação. O ganho obtido na produção das decapagens com as alterações de espessura a quente e mantido o mix atual foi aproximadamente 900 t/mês.

4 CONCLUSÕES

O conjunto de ações tomadas apresentadas neste trabalho atingiu o objetivo proposto de aumentar a produtividade das LDC's, contribuindo para o atendimento das ordens de venda e também permitindo um incremento da produção das decapagens da CSN-VR em torno de 28.000 toneladas/ano, em conformidade com as especificações requeridas.

As reduções nas temperaturas de bobinamento nas especificações apresentadas no trabalho, da ordem de 20°C a 30°C, não geraram rejeitos de qualidade por propriedades mecânicas fora dos limites de especificação.

A metodologia utilizada para análise e implantação de uma maior taxa de redução nos laminadores a frio da CSN-VR não acarretou desvios internos relacionados as propriedade mecânicas e ou de planicidade do material.

A modificação da condição da borda de aparada para natural, apesar de apresentar em alguns casos retrabalhos para eliminar defeitos oriundos de manuseio foi altamente positiva, atendendo as larguras nominais do produto final e manteve os atuais índices de arrebetamento por defeitos de borda em valores inferiores a 100 ppm.

REFERÊNCIAS

- 1 GONÇALVES, J. O; MACHADO, G. O.; FERRAZ, A. J. Avaliação das condições operacionais das soluções de decapagem. In: SEMINÁRIO SOBRE LAMINAÇÃO DA ABM, 1985, Porto Alegre. Anais do Seminário de laminação da ABM. São Paulo

- 2 DELWIG, F. W.; PEMPERA, F. G. Pickling of strip using controlled turbulence. Steel Technology International, London, p. 220-224, 1994.
- 3 CHEN, R.Y.; YUEN, W.Y.D. A study of the scale structure of hot rolled steel strip by simulated coiling and cooling, Oxidation of Metals, v. 53, n. 5/6, p. 539-560, Aug. 2000.
- 4 HUBMER, G.; RENDL, K.; OSTERKORN, A.; PUNTIGAM, R.; SESTAK, R.; THIELE, W. New method for the determination of the endpoint in steel pickling. Metallurgical Plant and Technology. Düsseldorf, v. 5, p. 68-78, October 2002.
- 5 DOERNEMAMM, A. G. Model-based control system for pickling lines. Iron and Steel Engineer, Pittsburgh, v. 74, n. 1, p. 47-50, Jan. 1997.
- 6 CHEN, R.Y.; YUEN, W.Y.D - Examination of Oxide Scales of Hot Rolled Steel Products, ISIJ International, Vol 45, 2005
- 7 GORNI, A. AUGUSTO, - Cálculos de laminação "Associação brasileira de metalurgia e materiais – ABM" - 2004
- 8 CALLISTER, "Materials science and engineering", 5ª Ed., John Wiley & Sons, 1999.