

CONTROLE DE “PONTA ALTA/BAIXA” NO LAMINADOR DESBASTADOR DA LTQ DA ARCELORMITTAL INOX BRASIL¹

Alexandre Henrique F. Dias²
Glaucio Barros Barcelos²
Arísio de Abreu Barbosa³
Clarissa Growoski Féder³
Willy Schuwarden Júnior³
Cleofas de Castro⁴
Elison Pinho dos Santos⁴
Felipe Grativol Lima⁵
Hamilton C. M. Estanislau⁵

Resumo

Este trabalho foca a solução do fenômeno de “ponta alta/baixa” no laminador desbastador. Define-se “ponta alta/baixa” como sendo o encurvamento das extremidades do esboço para cima ou para baixo na saída do laminador. As consequências deste encurvamento podem ser danos aos equipamentos e, dependendo da intensidade, poderá ocorrer o sucateamento do aço em processo. A solução adotada foi implantar lógica de automação capaz de permitir o ajuste operacional da diferença de velocidade entre cilindros de trabalho superior e inferior do laminador em até 20% da velocidade dos motores por um comprimento de até 3 metros, calculados a partir da extremidade do esboço. Na prática, se o material apresentar “ponta alta”, o operador deve ajustar o sistema de tal forma que a velocidade do cilindro de trabalho superior seja maior que a do cilindro inferior, fazendo com que a ponta do material abaixe. Os ajustes são realizados pelo operador da cabine de comando do laminador. Os testes iniciaram em setembro de 2008 e atualmente o recurso já está padronizado e sendo utilizado extensivamente. Em 2007 e 2008 os custos de sucateamento e de perda por hora parada na LTQ somaram mais de 1 milhão de reais. Em 2009, ano em que o projeto teve sua utilização difundida, estes custos somam aproximadamente 139 mil reais, uma redução de mais de 87%. Importante ressaltar que desde julho de 2009 não houve sucatas pelo motivo ponta alta/ou baixa.

Palavras-chave: Laminador desbastador; Ponta alta/baixa.

TURN UP/TURN DOWN CONTROL AT THE ROUGHER MILL AT ARCELORMITTAL INOX BRASIL

Abstract

This paper describes the solution proposed to the defect called strip curvature at the rougher mill. The strip curvature is defined as the curvature up or down of the ends of the transfer bar. The consequences can be either damage of the equipments and, depending on its intensity, the transfer bar scrap. The solution adopted was to implement an automation logic that permits the speed difference between top and bottom rolls to be adjusted until 20% of the speed of the rolls up to 3 meters from the extremity of the transfer bar. To summarize, if the transfer bar has its end turned up, the operator should adjust the system in a way that the speed of the upper roll be greater than the bottom roll, so the transfer bar end will turn down. The adjustments are done by the operator in the Rougher mill cabin. The tests started in September 2008 and nowadays the mechanism is standardized and being largely used. The total costs of scrap and loss time at HSM in 2007 and 2008 were over one million *reais*. In 2009, when the project was implemented, these costs were 139 thousand *reais*, 87% reduction. Since July 2009 any scrap due to strip curvature was registered.

Key-words: Rougher mill; Strip curvature.

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 Engenheiros de automação, Gerência da Laminação a Quente da AMIB; Timóteo - MG.

³ Engenheiros de processo, Gerência da Laminação a Quente da AMIB; Timóteo - MG.

⁴ Engenheiros eletricitistas, Gerência da Laminação a Quente da AMIB; Timóteo - MG.

⁵ Analistas técnicos, Gerência da Laminação a Quente da AMIB; Timóteo - MG.

1 INTRODUÇÃO

O processo de transformação de bobinas laminadas a quente é constituído basicamente de cinco fases: reaquecimento de placas, laminação de desbaste, laminação de acabamento, resfriamento da tira e bobinamento. Seguindo um único fluxo de produção mostrado na Figura 1, a placa, oriunda da Aciaria, é reaquecida no forno de reaquecimento e em seguida a sua espessura inicial é reduzida para uma espessura intermediária, na fase de desbaste no laminador desbastador (Figura 2). O produto desta fase é o que chamamos de esboço. O esboço é então laminado para a espessura final que pode variar de 2,0 mm a 12,7 mm no laminador acabador Steckel e, finalmente, já na forma de tira, é resfriada e bobinada. Ao longo de cada uma dessas fases são controlados vários parâmetros de processo, tais como: temperatura, velocidade, espessura, tempo, etc., para todos os aços processados na laminação de tiras a quente – LTQ.

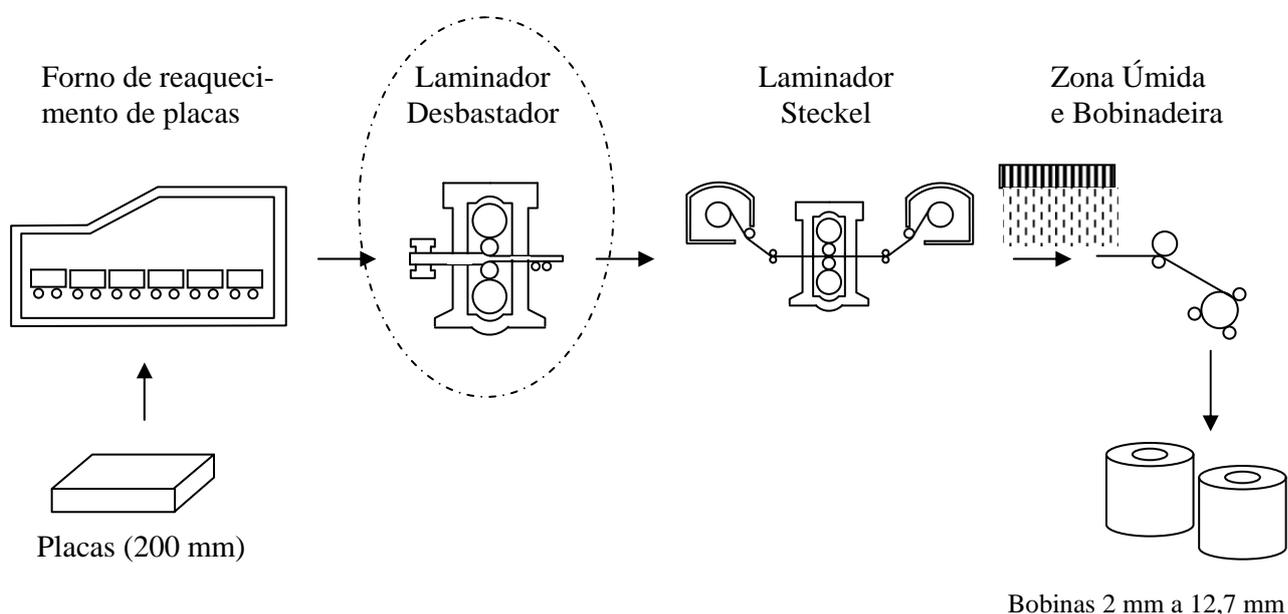


Figura 1 – Esquema simplificado da laminação de tiras a quente.



Figura 2 – Laminador desbastador.

O processo de desbaste é realizado na LTQ pelo laminador desbastador denominado como Rougher. Este equipamento em questão é o foco deste projeto aqui exposto.

O laminador Rougher consiste de uma cadeira de laminação quadro reversível, ou seja, uma cadeira composta de quatro cilindros dotados da capacidade de giro horário e anti-horário, conforme a necessidade do processo. Tal configuração pode ser observada na Figura 3.

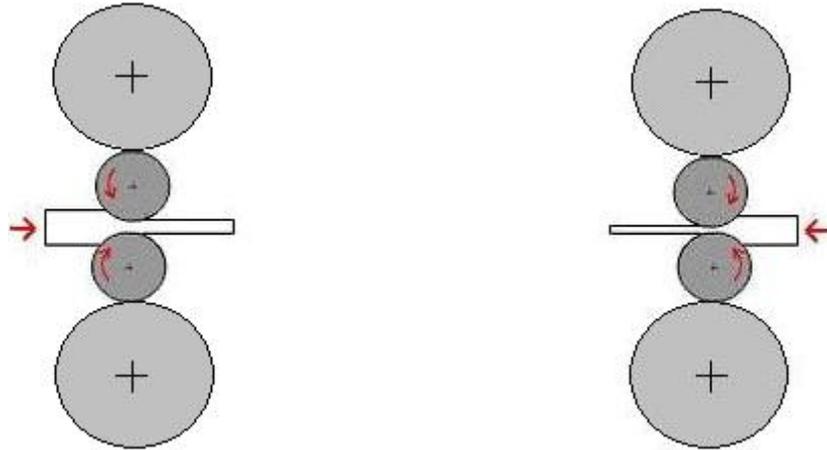


Figura 3 – Esquema de laminação quadro reversível.

Durante o processamento no laminador Rougher, o material pode ter sua extremidade encurvada para cima ou pra baixo. É este encurvamento que denominamos ponta alta ou ponta baixa (Figura 4).

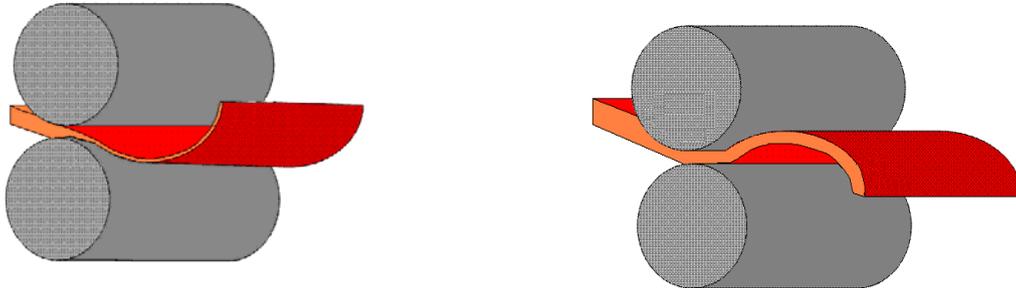


Figura 4 – Ponta alta e ponta baixa.

2 OBJETIVO

Reduzir a ocorrência de “ponta alta/baixa” no laminador desbastador, das sucatas decorrentes, das interrupções do processo produtivo e do risco de colisão do esboço ou da tira com os equipamentos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A busca por melhores resultados e por custos de produção mais baixos impulsionam análises mais críticas dos processos, reduzindo a tolerância a falhas e a desvios do produto final. Sendo assim, procedimentos e métodos capazes de evitar perdas de material e danos aos equipamentos impactam forte e favoravelmente nos custos de produção, tornando o processo mais robusto e o negócio mais rentável.

O encurvamento das pontas do esboço durante o processamento do material no laminador desbastador Rougher pode ter como conseqüência a colisão do esboço com as mesas de rolos, se a ponta tiver seu encurvamento para baixo, podendo causar sérios danos ao equipamento. A ponta alta pode, dependendo da sua altura, pode colidir com o cabeçote de descarepação, com outros equipamentos da linha como a tesoura de chapas grossas e a tesoura de pontas. Nos casos em que a ponta do material é tão alta que não é possível passar pela tesoura de chapas grossas os operadores eram forçados a retornar com o esboço para o laminador e passar a ponta entre os cilindros para baixá-la. Este procedimento, apesar de necessário, ocasiona diversos transtornos, como perda de temperatura e variação da espessura do esboço, além, é claro, de atrasos no processo. Dependendo da situação, se toma a decisão de sucatar o esboço ou, ao dar continuidade no processo estas alterações de temperatura e espessura provocam a interrupção do mesmo.

As causas para ocorrência de ponta alta ou ponta baixa são diversas e difíceis de controlar. Abaixo, são listadas as principais:^(1,2)

- diferença de velocidade entre cilindros;
- diferença entre os coeficientes de atrito do esboço com os cilindros de trabalho (ex.: carepa incrustada);
- distribuição heterogênea da resistência a deformação ao longo da espessura, devido a aquecimento irregular;
- ângulo de entrada do esboço desfavorável;
- grau de penetração da deformação; e
- desalinhamento entre os mancais dos cilindros de trabalho.

O fenômeno ponta alta/baixa, sendo uma condição de processo ainda não controlada, que pode afetar negativamente a vida útil dos equipamentos e que também pode provocar a perda do material produzido, motivou a busca por métodos e estratégias que resultaram na implantação deste trabalho.

3.1 Metodologia

A metodologia aplicada à solução do problema em questão resume-se em implantar um sistema de controle de direção das pontas do material em processo no laminador Rougher. A implantação de tal controle adotou a seqüência de procedimento abaixo:

- conhecer a forma de acionamento dos cilindros de trabalho do laminador desbastador;
- conhecer a estratégia de referência de velocidade do laminador desbastador;
- planejar a forma de atuação do controle a ser criado e a interface com o operador do laminador;
- mplantar a estratégia de controle planejada;
- realizar as experiências necessárias e avaliar os resultados.

3.2 Acionamento do Laminador Desbastador

Conforme já mencionado, o laminador desbastador tem a configuração quadro reversível. Nesta configuração os cilindros maiores, chamados cilindros de encosto, não são acionados, os mesmos são arrastados pelos cilindros menores, chamados cilindros de trabalho.

Os cilindros de encosto então têm função na aplicação de força na conformação mecânica do material. Já os cilindros de trabalho têm a mesma função, porém, os

mesmos são dotados de acionamento por motor individualizado e com velocidade controlada e sincronizada entre eles e os equipamentos auxiliares. O acionamento dos cilindros de trabalho é realizado por motores de corrente contínua e estes têm sua velocidade controlada por um conversor AC/DC, conversor este que possui embarcado as malhas de controle de corrente, torque, velocidade, entre outras, e ainda possui as configurações de proteção do equipamento. O conversor, por meio de seus módulos de entrada e saída, é capaz de controlar o acionamento dos cilindros conforme referências e comandos remotos.

3.3 A Estratégia de Referência de Velocidade

O sistema de controle do laminador desbastador da laminação a quente é dividido primeiramente em dois níveis.

O nível 2 engloba o sistema supervisório e o modelo matemático do laminador. Este sistema supervisório é a interface de automação do equipamento com os operadores. Por meio deste pode-se estabelecer parâmetros e ajustes para a execução de determinada tarefa pelo equipamento como, por exemplo, a definição do plano de passes do material quando a laminação é em modo manual, ou seja, o operador insere os dados necessários por meio deste sistema.

O nível 1 é constituído de todos os equipamentos elétricos e eletrônicos que, de posse das informações geradas pelo nível 2 e do sensoriamento e rastreamento do processo, é capaz de realizar o posicionamento do equipamento e também gerar as referências para o mesmo. Entre estes equipamentos, pode-se destacar o SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído), CLP (Controlador Lógico Programável) e os conversores AC/DC digitais. Tal configuração pode ser observada na Figura 5.

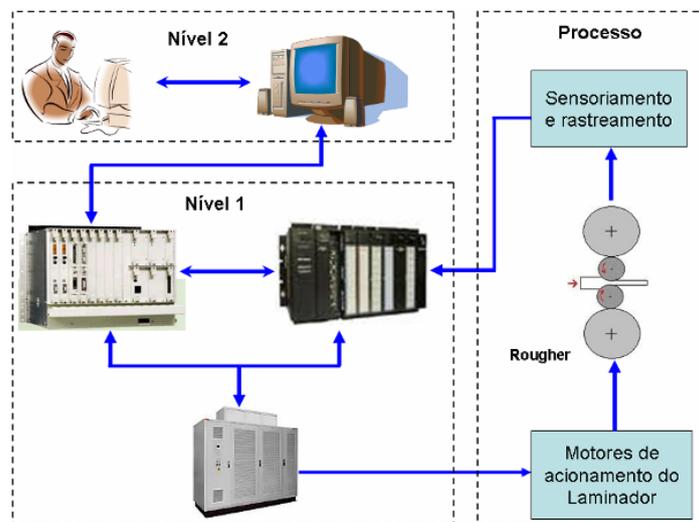


Figura 5 - Fluxo de Informações e referenciamento do Laminador Rougher.⁽⁴⁾

Na Figura 5 destaca-se então a automação computacional de Nível 2 onde se encontram as estações de operação e servidores. No Nível 1, devido a melhor capacidade de cálculos matemáticos e velocidade de processamento, o SDCD tem a função de gerar as referências para os equipamentos, além de sincronizá-los. O CLP, tendo atributos de lógicos discretos, tem a função de rastrear o material por meio de sensores e realizar a seqüência das etapas do processo interagindo e comandando os demais equipamentos. O conversor, com malhas de controle embarcadas, realiza o acionamento dos motores do laminador.

Sendo o SDCD o gerador de referência, é nele que está embutida a estratégia de controle de velocidade do laminador em questão. A estratégia, de forma resumida, é baseada em fazer com que os motores que movimentam os cilindros de trabalho atinjam a velocidade programada para o passe de laminação ou referência manual (advinda do operador). Para atingir a velocidade desejada, o SDCD calcula uma rampa de aceleração que atenda a capacidade de acelerar de todos os equipamentos envolvidos no processo.

Sob a carga de laminação, devido às forças envolvidas, é possível que um cilindro de trabalho realize mais ou menos torque sobre o material em relação ao outro. Tal evento é indesejável, pois pode acarretar danos ao material. A estratégia de controle de velocidade é dotada de um controle adaptativo de rampa de velocidade (ARC), que com base nas curvas que relacionam corrente, torque e velocidade, acondiciona a referência de velocidade deste motor para sincronizar o torque realizado com o outro.

A Figura 6 esboça o esquema básico da estratégia de controle de velocidade do laminador, contemplando o ARC (Controle adaptativo de rampa).

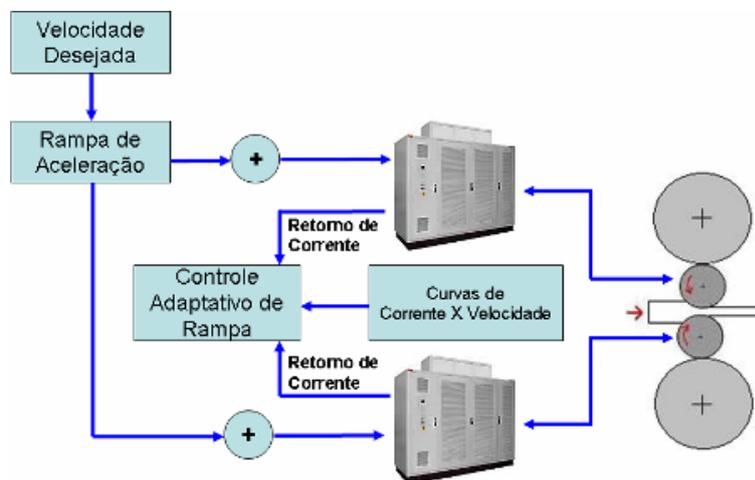


Figura 6 - Controle Adaptativo de rampa de velocidade do Laminador.⁽⁴⁾

3.4 A Estratégia do Controle de Pontas

O controle de pontas atua apenas no comprimento do que se considera ponta do material, através de torques diferenciados na superfície superior e inferior do material. Esta diferença de torque é realizada pelo delta de velocidade entre o cilindro de trabalho superior e o inferior. A diferença de velocidade é limitada para não provocar danos superficiais severos no material e cilindro.

A atuação do controle de pontas é evitada pelo controle adaptativo de rampa que, como já mencionado, fará com que a referência de velocidade seja adaptada para a realização do mesmo torque pelos cilindros (Figura 7). Portanto, para a efetiva correção das pontas, o controle adaptativo de rampa deve ter sua atuação inibida enquanto estiver ativo o controle de pontas, e, ao fim deste evento o mesmo deve ser habilitado.

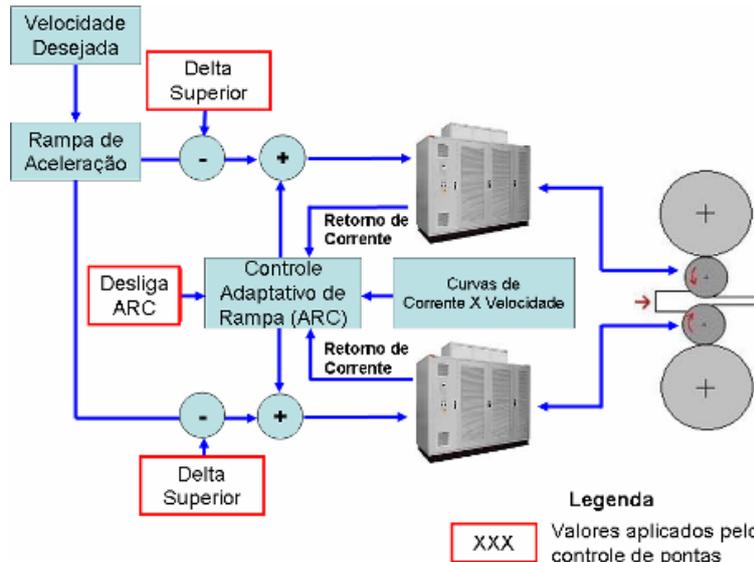


Figura 7 - Ação do Controle de Pontas na lógica de referência de velocidade do Laminador.⁽⁴⁾

O controle de pontas tem seus parâmetros acessíveis ao operador e este, por sua vez, é capaz de ativar ou desativar o controle de pontas conforme a necessidade. Os parâmetros para atuação do controle de pontas, os quais o operador deve informar, são:

- comprimento de atuação controle. (Faixa de trabalho: 0 a 3 m);
- percentual de diferença de velocidade. (Faixa de trabalho: 0 a 100%); e
- direção de atuação (Ponta Alta, Ponta Baixa).

Estes parâmetros são atualizados pelo operador através da estação de operação (Nível 2), eles são tratados pelo SDCD (Nível 1). O percentual de diferença de velocidade quando ajustado para 100% é transformado em um fator multiplicador da referência de velocidade de 0,2, o resultado então é o delta aplicável às referências, Figura 8.

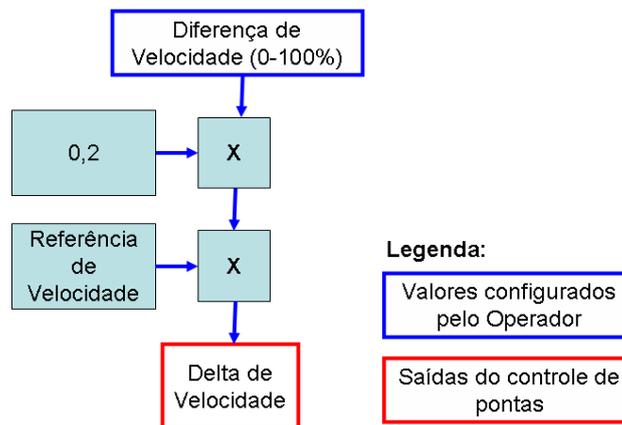


Figura 8 – Cálculo do delta de velocidade.⁽⁴⁾

Se a solicitação do operador for ponta alta, a referência de velocidade do motor do cilindro inferior é subtraída do delta de velocidade calculado. No caso de ponta baixa, o delta é aplicado na referência do motor superior.

O tempo de atuação do controle de pontas é baseado no comprimento informado pelo operador. Para isto, no instante em que o material é detectado entre os cilindros, o SDCD inicia um cálculo integral da velocidade média entre os motores

inferior e superior para mensurar indiretamente o comprimento de material que já passou por entre os cilindros. O valor de comprimento calculado é comparado com o configurado pelo operador, quando o primeiro alcança o valor maior ou igual ao segundo a ação do controle de pontas é encerrada neste passe de laminação, Figura 9.

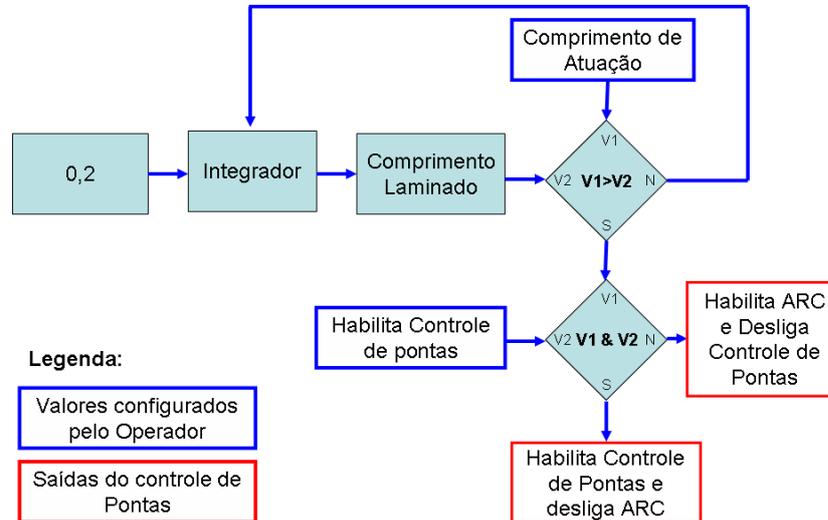


Figura 9 - Cálculo de comprimento laminado e ativação do ARC e controle de pontas.⁽⁴⁾

O delta de velocidade é subtraído e não adicionado às referências para garantir a atuação do controle mesmo em limite superior de velocidade, pois, se os cilindros estiverem em velocidade máxima e o controle adicionar o delta à referência de um deles, este não será efetivamente realizado, pois, será ceifado pelo limite do equipamento.

Esta, portanto, é a estratégia de controle adotada para contornar a ocorrência de ponta alta ou baixa no laminador desbastador.

3.5 A Influência do Grau de Deformação

Estudos constataram que a ação combinada da diferença de velocidade com o grau de penetração da deformação pode alterar a intensidade e até mesmo o sentido do encurvamento (1). O grau de penetração da deformação, m , é definido em função do comprimento do arco de contato, das espessuras de entrada e saída e do raio do cilindro de trabalho. O fator m é uma medida da heterogeneidade da deformação nas camadas centrais do material laminado e é definido como:

$$m = \frac{l_d}{h_m} \quad \text{sendo que,} \quad l_d = \sqrt{R(h_0 - h_1)} \quad \text{e} \quad h_m = \frac{h_1 + 2h_0}{3}$$

Onde:

- l_d : Comprimento do arco de contato [mm];
- h_m : Espessura média ponderada [mm];
- h_0 : Espessura do material na entrada do laminador [mm];
- h_1 : Espessura do material na saída do laminador [mm];
- R : Raio do cilindro de trabalho [mm].

A Figura 10 nos mostra as alterações na curvatura das pontas em função do grau de deformação, considerando diferentes deltas de velocidade. Nota-se que ocorre a inversão do sentido do encurvamento a partir do momento em que o grau de deformação atinge aproximadamente 1,4. Tais valores foram obtidos em um laminador de chapas grossas.

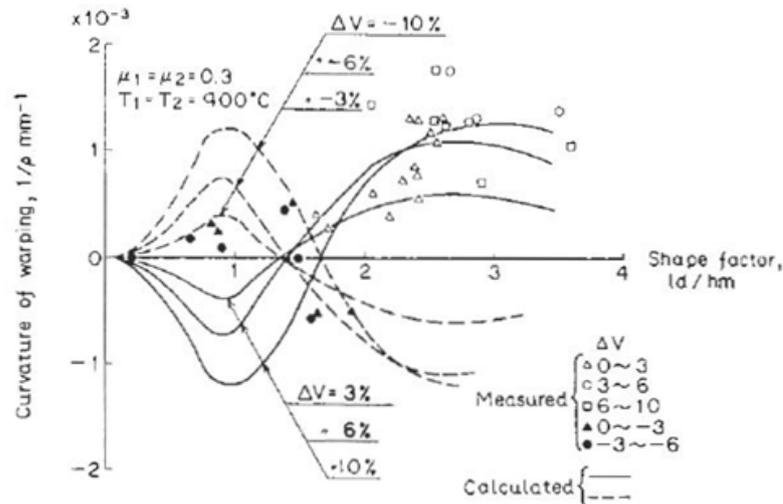


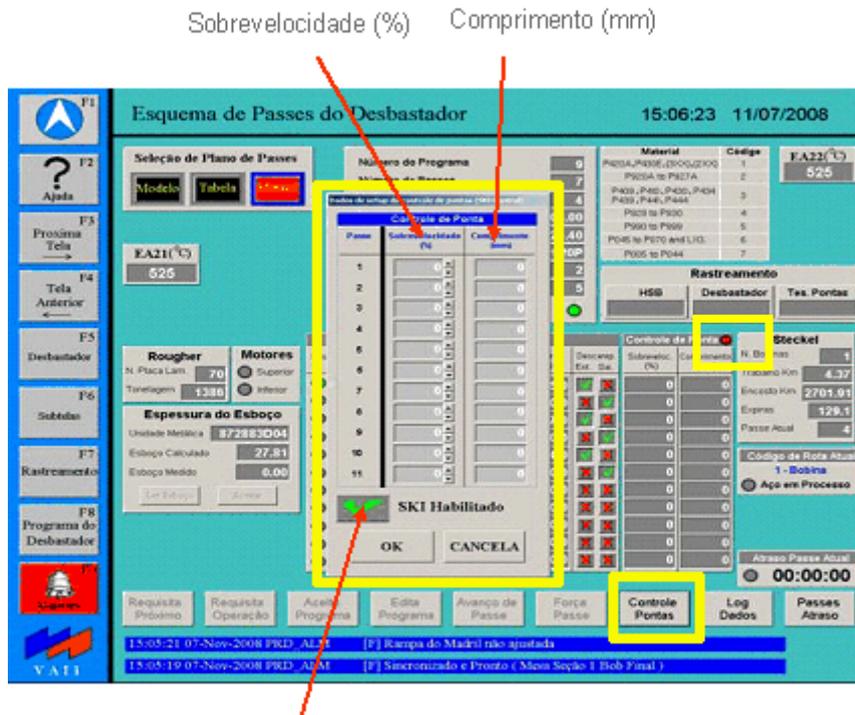
Figura 10 – Valores de curvatura obtidos em um laminador de chapas grossas.⁽¹⁾

O uso do controle de pontas nos permite evitar que as pontas do esboço se curvem para cima ou para baixo. Porém, ao se laminar com um grau de penetração acima de um determinado valor o ajuste torna-se complexo aos olhos dos operadores, pois se entra na região de inversão da direção de encurvamento. Assim, os operadores acabam por realizar ajustes que resultam em efeitos contrários aos esperados.

3.5 A Atuação do Operador

A seguir são mostrados os passos necessários para a atuação do controle de pontas, tendo como referência a Figura 11:

- clicar no botão "Controle de Pontas" na tela da MMI do Laminador desbastador;
- digitar os valores desejados de ajuste no campo "Sobrevelocidade" de 0 a 100%:
 - o ajuste positivo (+) corresponde a solicitação de ponta alta e, portanto, faz com que a velocidade do motor superior seja menor que a do inferior;
 - o ajuste negativo (-) corresponde a solicitação de ponta baixa e, portanto, faz com que a velocidade do motor inferior seja menor que a do superior.
- no campo comprimento digitar os valores desejados de 0 a 3000 mm;
- clicar no botão "Ski Habilitado" e então em "OK". É possível deixar o controle de pontas pré-ajustado clicando somente em "OK" após digitar os valores desejados; e
- verificar se na tela "Esquema de Passes do Laminador Desbastador" a luz indicativa ao lado do "Controle de pontas" está verde. Verde indica "Ski Habilitado" e vermelho indica "Ski Desabilitado".



Botão usado para ativar / desativar o SKI

Figura 11 – Tela do supervisor na cabine de controle do laminador.

4 RESULTADOS

Antes de se utilizar o controle de pontas nos aços inoxidáveis foi realizado um teste em aços carbono. A qualidade superficial nos aços inoxidáveis é uma característica muito controlada e o risco seria ocorrer alguma marca no cilindro que marcasse o produto.

O primeiro teste foi realizado em seis placas de aço baixo carbono de espessura final 6,3 mm em setembro de 2008. O objetivo do teste era provocar ponta alta no material para validar o funcionamento do controle de pontas.

A Tabela 1 mostra os ajustes utilizados e os resultados obtidos. A primeira placa foi utilizada como referência para se ter conhecimento de como o material estava se comportando para comparação com o material do teste.

Tabela 1: Resultados do primeiro teste com aços carbono

UM	Nr passe	Sobrevelocidade	Comprimento (mm)	Resultado
813759H03	5	0	0	ponta baixa leve
	6	0	0	ponta alta leve
	7	0	0	plano
813759H08	5	10%	1000	ponta alta média
	6	10%	1000	nada
805776B02	5	20%	1000	ponta alta
	6	20%	1000	nada
805776B03	5	20%	1000	ponta alta
	6	30%	1000	nada
805776B08	5	0%	1000	plano
	6	50%	1000	nada
805776B01	5	20%	1000	ponta alta
	6	100%	1000	nada
813757B09	4	50%	2000	ponta alta
	5	-10%	1000	ponta baixa leve
	6	100%	2000	nada

O teste foi realizado com sucesso, comprovando a eficácia do controle de pontas no laminador desbastador. Observa-se, portanto, que não se obteve resultado no sexto passe.

O cilindro de trabalho foi inspecionado e não foram observadas marcas resultantes da utilização do controle de pontas.

Após este teste foi realizado o treinamento dos operadores para utilização do controle de pontas.

O próximo passo foi realizar um teste nos aços inoxidáveis austeníticos 3XX, em novembro de 2008. O teste foi realizado em 5 placas. Os resultados são apresentados na Tabela 2, sendo que a primeira placa, assim como no primeiro teste, foi utilizada como referência.

Desta vez, porém, testou-se o ajuste invertido no sexto passe, confirmando a teoria do grau de deformação. Ao se utilizar a demanda de ponta baixa, o material apresentou ponta alta.

Este teste possibilitou aos implementadores, operadores e supervisores adquirirem maior sensibilidade no uso da ferramenta. As bobinas do teste foram todas aprovadas na laminação a frio, ou seja, não houve desvios relacionados com a utilização do controle de pontas.

Tabela 2: Resultados do segundo teste com aços inoxidáveis

UM	Nr passe	Sobrevelocidade	Comprimento (mm)	Resultado
807327B02	1,3,5	0	0	ponta baixa leve
	6	0	0	ponta alta leve
	7	0	0	Plano
843961D02	5	10%	1000	ponta alta
	6	10%	1000	Nada
843961D03	5	10%	500	ponta alta (inferior anterior)
	6	-10%	1000	ponta alta !!
807324I02	1	10%	200	manteve ponta baixa leve
	3	10%	200	ponta alta leve
	5	-10%	200	ponta baixa leve
	6	10%	1000	ponta baixa leve
807324I09	1	10%	500	ponta baixa leve
	3	10%	500	"S"
	5	10%	250	"S" plana
	6	10%	500	ponta baixa leve
807337A09	1	10%	1000	corrigiu ponta baixa
	3	10%	1000	"S"
	4	10%	1000	ponta alta
	5	10%	250	"S" plana
	6	10%	500	ponta baixa leve

O próximo passo seria utilizar o controle de pontas na ocorrência de ponta alta, porém, após este teste, se passou um longo período sem a ocorrência de ponta alta nos aços 3XX.

A partir de junho de 2009, com o aumento da produção, a ocorrência de ponta alta se tornou mais freqüente e os operadores começaram a demandar uma maior utilização do controle de pontas, inclusive para outros aços, como os aços elétricos de grão não-orientado (GNO).

Nestes aços a ocorrência de ponta alta exige que se corte a descarepação nas pontas. A ponta alta faz com que a água de descarepação se acumule nas pontas provocando um resfriamento localizado que causa problemas no corte da cabeça na tesoura de pontas. Além disso, a descarepação nestes aços é um item crítico, pois a carepa formada é de difícil remoção. A utilização do controle de pontas possibilita a utilização da descarepação ao longo de todo o comprimento do esboço.

Atualmente o recurso está padronizado e sendo utilizado extensivamente.

O projeto teve também, além dos ganhos operacionais, alguns ganhos financeiros. Em 2007 os custos de sucateamento por motivo ponta alta/baixa somados aos custos de hora parada da LTQ totalizaram 582 mil reais. Em 2008 estes custos totalizaram 521 mil reais. Em 2009, ano que o projeto teve sua utilização difundida, estes custos não passaram de 138 mil reais (Figura 12). Vale ressaltar, que desde julho de 2009 não há registros de sucatas pelo motivo ponta alta/baixa.

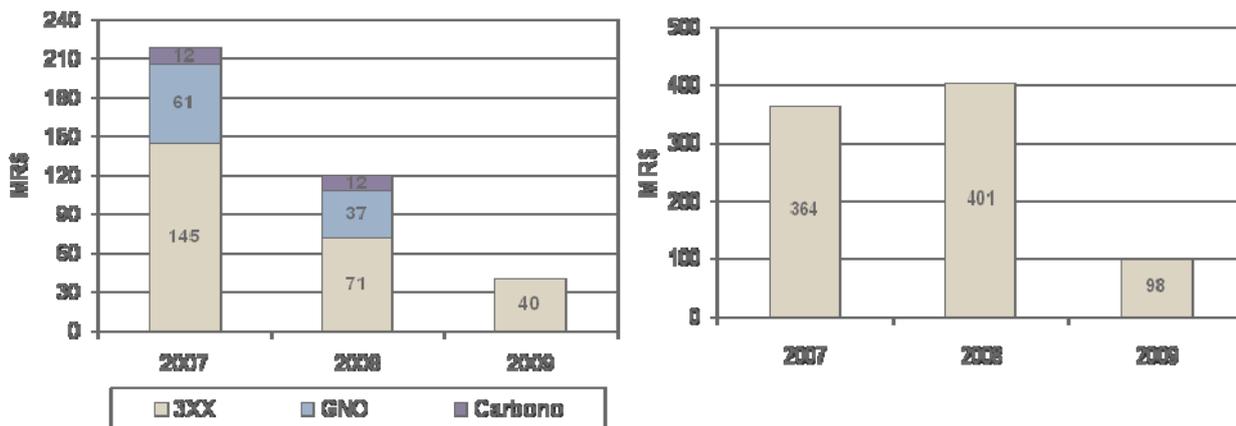


Figura 12 a) Custo do sucateamento em valores de 2009; b) Custo da hora parada na LTQ em valores de 2009.

5 CONCLUSÃO

O controle de pontas demonstrou ser uma excelente ferramenta na laminação de desbaste na LTQ da ArcelorMittal Inox Brasil. A confiança dos operadores na ferramenta é indiscutível e a minimização dos problemas decorrentes do encurvamento das pontas do esboço é um fato.

Em 2007 e 2008 os custos de sucateamento e de perda por hora parada na LTQ somaram mais de 1 milhão de reais. Em 2009, ano em que o projeto teve sua utilização difundida, estes custos somaram aproximadamente 139 mil reais, uma redução de mais de 87%. Importante ressaltar que desde julho de 2009 não houveram sucatas pelo motivo ponta alta/ou baixa.

REFERÊNCIAS

- 1 GORNI, A.A.; CAVALCANTI, C. G.; DOLABELA DA SILVEIRA, J. H.; STUART, M. A.; REIS, J. S. S. **Estudo sobre as causas da ocorrência de ponta alta num laminador de chapas grossas**. Trabalho apresentado no Seminário de Laminação da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Porto Alegre, Novembro de 1992.
- 2 DAUPHIN, S.; CORDIER, Ph.; BOUTOILLE, P.; COLIN, C.; COUPU, J.; PETIT, B. **Industrial ski-end mastering at Arcelor Dunkirk roughing mill**.
- 3 MOREIRA, A.C.; DE OLIVEIRA, N.N.; ROMA, R.S.; MARTINHO, W.C. **Redução do efeito do esboço com ponta alta na saída da cadeira R2 no desbaste do LTQ-2 da CSN**. XXXV Seminário de Laminação da ABM, São Paulo, agosto de 1998.
- 4 SEGORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process Dynamics and Control**. Singapore: Ed. John Wiley & Sons, Inc, 1989.