



OS BENEFÍCIOS DA UTILIZAÇÃO DA ESTRATÉGIA TAPERING NA REDUÇÃO DAS CARGAS DE LAMINAÇÃO NAS PONTAS DA TIRA EM LAMINADORES STECKEL*

Altair Lúcio de Souza¹
 Jacson Moraes Borges²
 Joao Júnio Pereira Lino³
 John Hanna Frenn⁴
 Maurício Martins Pereira⁵
 Willy Schuwarten Júnior⁶

Resumo

A laminação de tiras a quente com laminadores *Steckel* tem como característica um perfil de temperatura mais baixa nas pontas sendo este um dos motivos que geram cargas de laminação muito mais altas nesta região. A carga de laminação elevada tem como consequência no processo a geração de desvios de planicidade e o alto risco de rompimento do material nos passes finais de laminação. Este trabalho tem como objetivo demonstrar os benefícios da utilização da estratégia de *Tapering* para a laminação de tiras de espessura fina em laminador *Steckel*. Foi feita a comparação das cargas de laminação do material laminado e o acompanhamento dos resultados de planicidade obtidos antes e depois da implantação desta função. Ao fim do trabalho verificamos que a estratégia de *Tapering* é essencial para o processamento de materiais finos com laminadores *Steckel*.

Palavras-chave: Laminador *steckel*; *Tapering*; Laminação a quente; Cargas de laminação.

THE BENEFITS OF USING THE TAPERING STRATEGY FOR ROLLING LOAD REDUCTION AT THE HEAD AND TAIL ENDS AT STECKEL MILLS

Abstract

The hot strip rolling using Steckel Mill has the characteristic profile where the temperature at the head and tail ends is lower when compared to the body and therefore, the rolling load is a lot higher at this region. This paper has the objective of demonstrate the benefits of using the tapering strategy for hot rolling process for thin material using Steckel Mills. We have made a comparison at rolling loads and profile results between after and before the function implementation. At the end of work we have verified that this strategy is essential to roll thin material with Steckel mills.

Keywords: Steckel mill; Tapering; Hot rolling; Rolling loads.

- ¹ Engenheiro Metalúrgico, Mestre em Metalurgia, Assessor Técnico, Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Ouro Branco, UFOP e UFMG, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.
- ² Técnico de Processos, Assessor Técnico, Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil;
- ³ Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia de Materiais, Assessor Técnico, Laminação de Tiras a Quente, Gerdau e UFOP, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.
- ⁴ Engenheiro de Automação, Bacharel, Consultor, Siemens VAI, Ostrava, República Tcheca;
- ⁵ Engenheiro Metalúrgico, Chefe da Linha de Laminação de Tiras a Quente, Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Ouro Branco, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil;
- ⁶ Engenheiro Mecânico, Mestre em Metalurgia, Gerente da Linha de Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Ouro Branco, UFMG, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

O laminador de tiras a quente da Gerdau entrou em operação no mês de Outubro do ano de 2013 e desde então passou por grandes avanços no desenvolvimento do mix de produção. As dimensões de produtos que compõem o mix de produção do laminador da Gerdau são na espessura de 2 a 20 mm, nas larguras de 900 a 2100. Na medida em que a espessura diminui e a largura aumenta, aumenta também a dificuldade no processamento.

O maior problema apresentado é o perfil de variação da carga de laminação entre pontas e corpo da tira característico em laminadores *Steckel*. A carga de laminação elevada nas pontas tem como consequência no processo a geração de desvios de planicidade e o alto risco de rompimento do material nos passes finais de laminação. Para atenuar os desvios de planicidade devido a variação de carga é utilizado durante o passe de laminação o recurso do *Work Roll Bending* que às vezes se torna limitado. O rompimento do material acarreta em sucata de toda a tira gerando grandes perdas no processo.

Além das ações tradicionais para aumento de temperatura nas pontas e portando diminuição da carga nesta região, uma estratégia de laminação é utilizada de forma complementar denominada *Tapering*. O trabalho tem o objetivo de apresentar a utilização desta estratégia.

1.1 Processo *Steckel* e suas Características

O laminador tipo *Steckel* foi idealizado pelo engenheiro americano Abram Peters Steckel. Entrou em operação comercial em 1932, na Youngstown Sheet & Tube Company's Brier Hill Works, em Ohio, USA [1].

A principal diferença tecnológica entre os métodos tradicionais para a laminação de tiras a quente e a tecnologia de laminação com laminadores *Steckel*, é o processo final de laminação que é feito com uma cadeira, ou duas no caso do Twin Stand, reversíveis equipadas com duas bobinadeiras forno localizadas no lado de entrada e saída do laminador [2]. Estas têm a função de manter a temperatura do material laminado e acomodar estes nelas, visto que não existe espaço físico para receber o material que sofreu a redução na espessura e consequente alongamento.

Os laminadores *Steckel* representam as soluções econômicas para a produção de laminados a quente. Estes também podem ser lucrativos quando usados para produzir aços Carbono e aços especiais, quando a produção for limitada e os lotes de pedidos forem pequenos.

O processo de preparação do esboço deve ser feito em um número mínimo de passes assegurando assim que uma máxima temperatura de esboço seja conseguida.

Ao observar a Figura 1, é possível ter uma visão geral dos equipamentos principais do laminador *Steckel* [3]

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

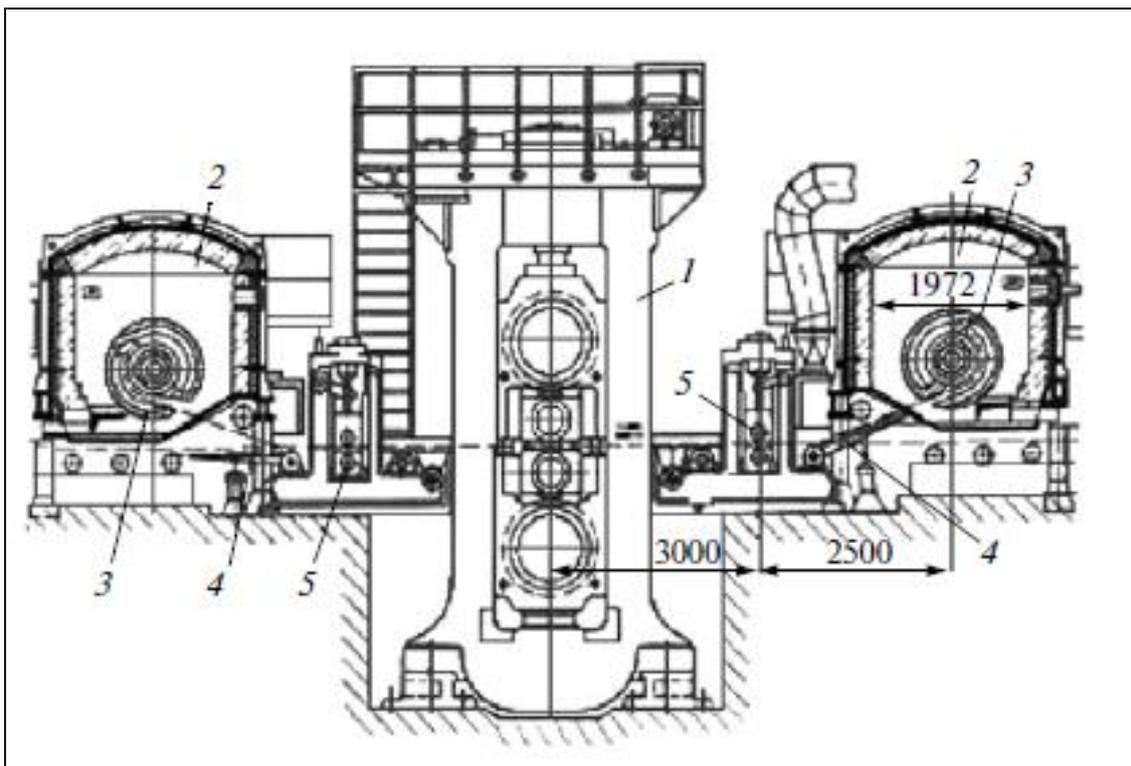


Figura 1. Laminador Quádruplo Reversível 1200 de Largura com Fornos Bobinadeira: (1) Cadeira Quádruplo; (2) Fornos; (3) Bobinadeiras; (4) Guias; (5) Mesa de Rolos.

O processo no laminador *Steckel* pode ser descrito em algumas etapas: O material é desbastado e logo após é enviado para a Tesoura de Pontas para eliminar o defeito que geralmente aparece nas pontas do esboço devido ao escoamento irregular do material durante o processo de desbaste, este pode receber um jato de água em alta pressão no processo denominado de Descarepação, onde a carepa (oxidação) é removida por choque térmico e impacto mecânico. Então o material é submetido aos esforços de laminação entre os cilindros de trabalho e é conduzido aos fornos bobinadeiras pelos rolos puxadores e mesas de rolos auxiliares, onde, no momento exato, os sistemas de automação determinam a partida dos dromos para captação da ponta e início do bobinamento do material. Todo este processo de inserção é feito em velocidades relativamente baixas. Ao iniciar o bobinamento todos os equipamentos são acelerados de forma sincronizada para a velocidade ideal de laminação. Quando o passe termina, os equipamentos fazem o posicionamento e se preparam para fazer a mesma sistemática em sentido reverso. Isto se repete até se chegar à espessura desejada, quando o material é enviado para o bobinamento final. O processo de entrada e saída da tira dos dromos e processo de reversão descrito estão ilustrados na Figura 2 [4].

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

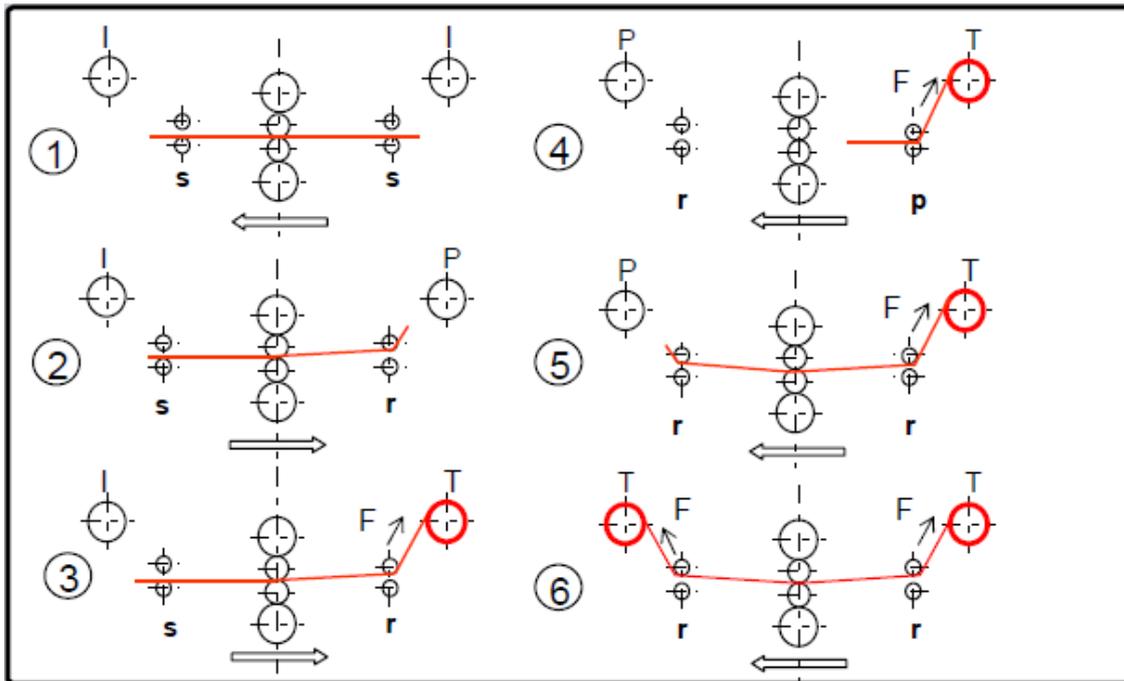


Figura 2. Processo Steckel

Durante cada processo de reversão, na qual envolve paradas, desbobinamento, reversão, e mordidas no laminador, as pontas do material estão sujeitas a um resfriamento maior do que seu corpo. Em decorrência disto ocorre um degrau na temperatura que pode chegar até a 250°C em ambas as pontas do material [2]. Com a conseqüente redução na temperatura, a força de laminação ao longo do comprimento do material aumenta nas pontas. Esta característica é típica em laminadores *Steckel*, como pode ser observado na Figura 3.

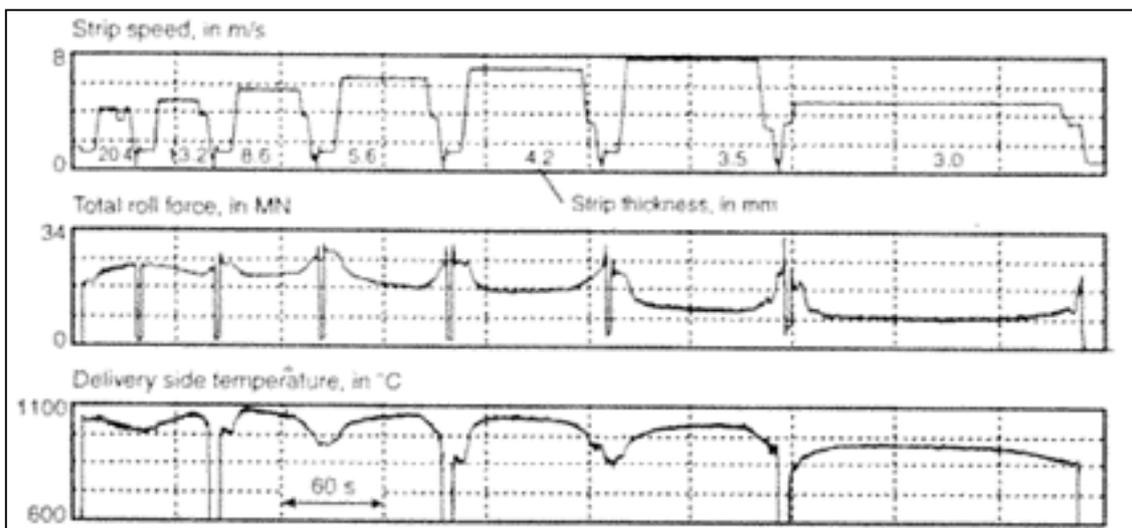


Figura 3. Typical Rolling Record of Strip Temperature and Roll Force of a Steckel Mill

Picos na força de laminação são encontrados devido a um acréscimo na tensão de escoamento a quente na faixa de temperatura que geralmente são atingidas na cabeça e cauda do material, representado na Figura 4. Além do que, o atraso na recristalização devido à redução de temperatura, aumenta significativamente nos últimos passes [2]. Souza [5] afirma que quando a temperatura cai espera-se que a resistência à deformação aumente.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

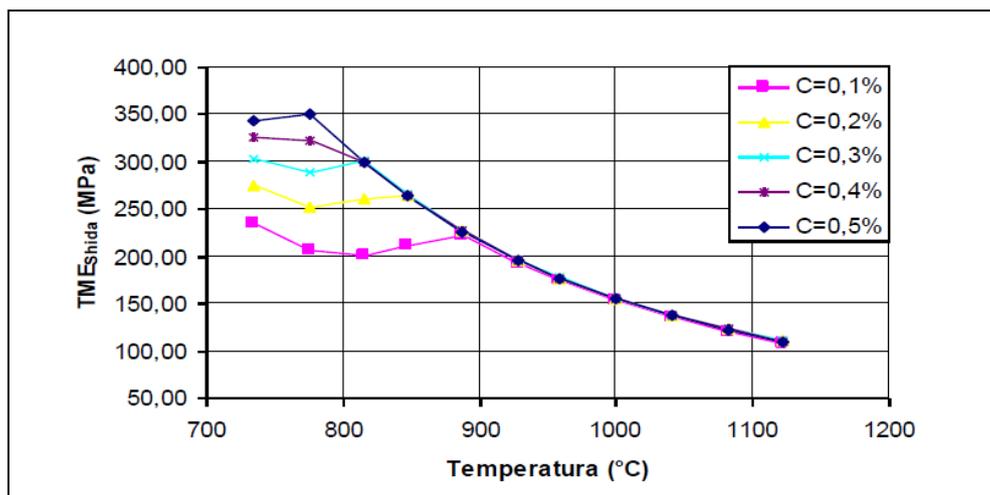


Figura 4. A evolução da TME em função da temperatura para diferentes teores de carbono utilizando a equação de Shida.

Quando se está laminando aço Carbono, a carepa secundária que é formada naturalmente dever ser eliminada com água de descarepação durante cada passe que contribui para perda de temperatura do material. Na medida em que a espessura do passe fica menor o resfriamento é intensificado, principalmente nas pontas.

Para diminuir as quedas de temperatura nas pontas, os motores principais e os equipamentos auxiliares do laminador (ajuste hidráulico da abertura dos rolos, automação, sequência, posicionamento das guias, etc.) devem ser ajustados para permitir uma rápida reversão. Tempos de reversão em torno de quatro segundos podem ser conseguidos configurando assim uma ótima prática. Um exemplo de tempo de reversão é ilustrado na Figura 5 que demonstra o tempo entre passes retirado de dados do processo de laminação.



Figura 5. Tempo de Reversão Steckel em 4,72 segundos.

Além de tempos de laminação e reversão menores, práticas de descarepação diferenciadas e bom controle dos fornos do *Steckel* é utilizada ainda a estratégia de *Tapering*, para complementar o esforço para diminuição das cargas nas pontas inerentes ao processo durante o último passe de acabamento com consequente melhora nas condições de laminação e planicidade da tira. Esta estratégia consiste na obtenção de um perfil de espessura variável ao longo do comprimento da tira nos passes intermediários fazendo com que as pontas tenham a espessura reduzida ao longo de um comprimento determinado. Como consequência ocorre uma redução da força de laminação nas mesmas para o último passe. A Figura 6 indica uma criação do *Tapering* com o aumento da redução na cauda do material em a, em b o perfil do

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



material com *Tapering* na cauda e em c indica a remoção do *Tapering* com uma redução menor nessa região.

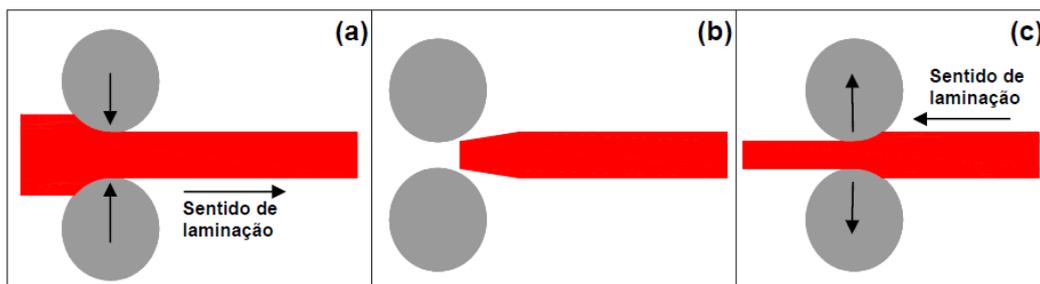


Figura 6. Desenho esquemático da função *Tapering*.

Dependendo da intensidade do *Tapering* aplicado a força nas pontas continua mais elevada do que no corpo da tira devido a menor temperatura ou esta diferença pode se tornar nula. Essa redução de força gera uma maior estabilidade no processo e melhoria da forma da tira [5].

1.2 Laminador de Tiras a Quente da Gerdau

O novo laminador de tiras a quente da Gerdau possui uma concepção compacta para produção de bobinas a quente. Com 270 metros de comprimento tem capacidade de 823 mil t/ano de bobinas a quente nas espessuras entre 2,0 e 20 mm e largas entre 900 e 2100 mm [7].

A figura 7 apresenta o laminador de tiras a quente da Gerdau esquematicamente. Este é constituído por: (i) um descarepador primário (ii) dois fornos de reaquecimento onde as placas são reaquecidas para a temperatura de laminação (aproximadamente 1200°C); (iii) um laminador *Steckel* onde ocorrem todos os passes de redução da espessura da placa até a espessura final (desbaste e acabamento); (iv) uma Tesoura Rotativa que faz o corte das pontas irregulares do esboço ao final da etapa de desbaste (espessura de 24 a 39 mm); (v) uma mesa de resfriamento com 36 bancos tubulares; (vi) e uma bobinadeira hidráulica [8] e [9].

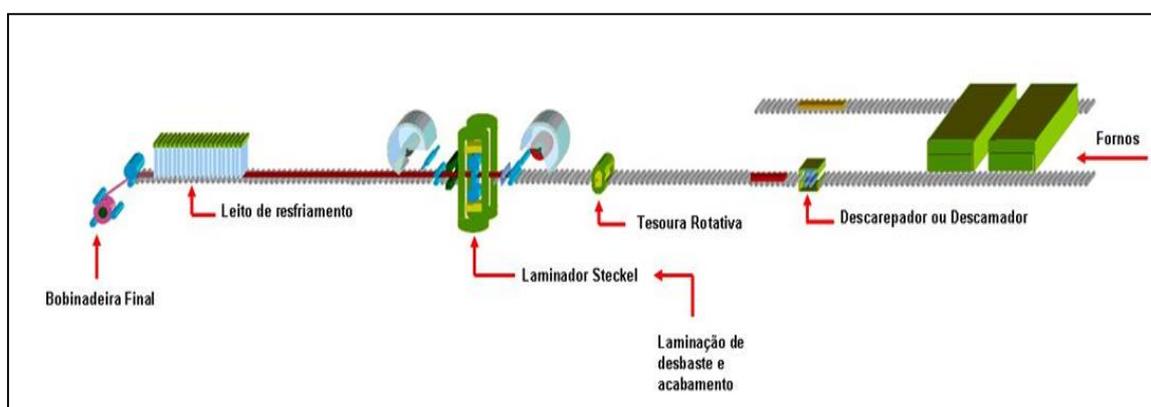


Figura 7. Desenho esquemático do laminador de tiras a quente da Gerdau.

O projeto foi concebido com as mais recentes tecnologias para controle da temperatura, dimensão e forma do laminado. Com respeito ao controle de qualidade, foi instalado um Sistema de Inspeção Superficial Automático para assegurar a qualidade de todas as tiras laminadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



A estratégia de *Tapering* consiste na obtenção de um perfil de espessura variável ao longo do comprimento da tira laminada nos passes intermediários sendo que as pontas têm a espessura reduzida ao longo de um comprimento determinado.

O modelamento matemático do laminador de tiras a quente da Gerdau fornece os valores de referência para cada passe: posição da abertura de cilindros (GAP), velocidades de laminação, força de laminação e bending, posição do shifting, torque, dimensões nominais da tira, quantidade de água de refrigeração dos cilindros de trabalho, e ganhos dos controles dinâmicos (AGC – *Automatic Gauge Control*, DPC – *Dynamic Profile Control*) [6]. Este faz os cálculos destas variáveis em múltiplos *setpoints* ao longo do comprimento do laminado totalizando 20 pontos. O sistema de automação (Nível 1) faz a interpolação dos *setpoints* recebidos e aplica durante o processamento do material. A disposição dos múltiplos *setpoints* é demonstrada esquematicamente na Figura 8.

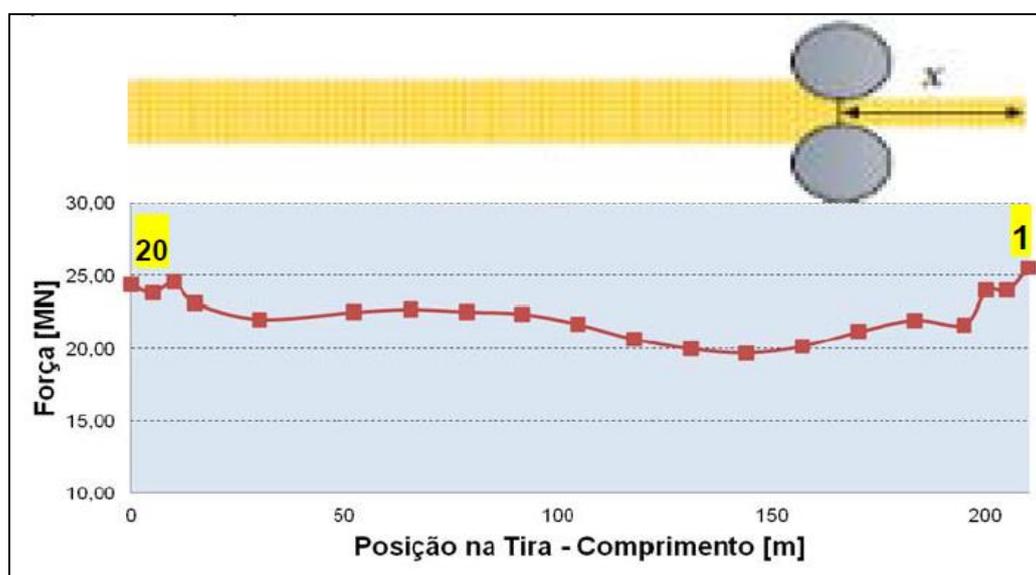


Figura 8. Exemplo de um Múltiplo *Setpoint* ao Longo do Comprimento da Tira.

Foram selecionadas cinco tiras para a espessura final de 3 mm na largura de 1200 mm do material SAE 1012. Para todas as tiras foram executados 8 passes de desbaste e 5 passes de acabamento no *Steckel*.

A primeira da sequência foi laminada normalmente sem a utilização do *Tapering*; na segunda foi aplicado 100 Micra de *Tapering* no penúltimo passe; na terceira 150 Micra de *Tapering*. Na quarta foi aplicado 220 Micra de *Tapering*; e na quinta foi aplicado 300 Micra no penúltimo passe. Em todos os casos o *Tapering* foi aplicado nos últimos 30 metros. Estão sumarizados na Tabela os procedimentos definidos acima.

Tabela 1 Exemplo de *Tapering* Aplicado

Sequência	<i>Tapering</i> (μm)
Tira 1	0
Tira 2	100
Tira 3	150
Tira 4	220
Tira 5	300

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



Nos passes anteriores ao penúltimo (3 primeiros) foram aplicados *Tapering* de forma proporcional com maior profundidade na espessura e em um menor comprimento. A tabela 1 exemplifica o procedimento descrito acima aplicado na Tira 4.

Tabela 2 Exemplo de *Tapering* Aplicado

Número do Passe	Espessura (mm)	<i>Tapering</i> (mm)	Comprimento (m)
1	16,17	1,16	7,7
2	9,12	1,22	14,1
3	5,88	0,58	21,5
4	4,09	0,22	30,2
5	3,00		

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição da espessura realizada e calculada para o penúltimo e último passe ao longo do comprimento para o material laminado sem a utilização da estratégia de *Tapering* (Tira 1) está sendo mostrada na Figura 9.

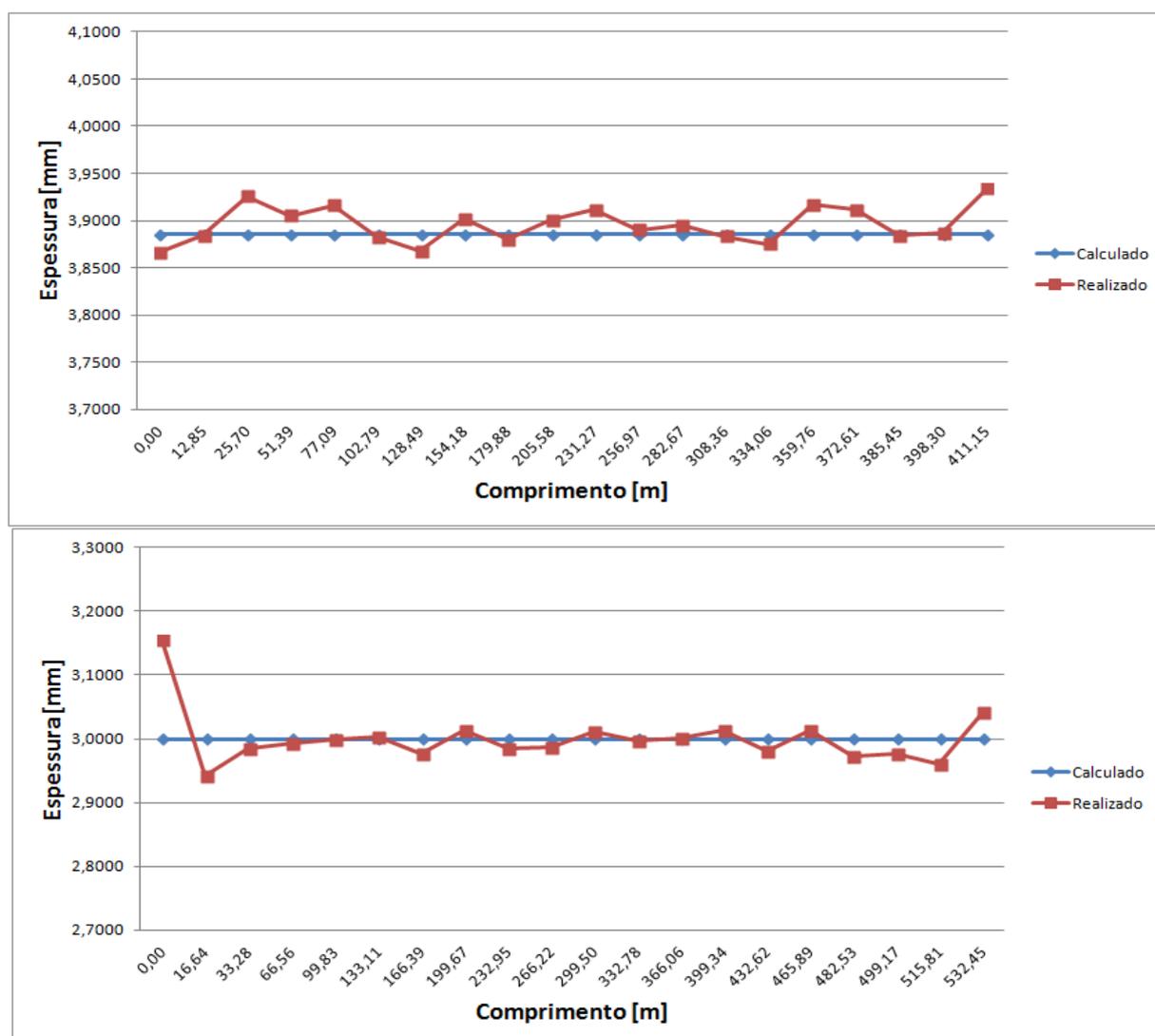


Figura 9. Múltiplos *Setpoints* do Penúltimo e Último Passe de Laminação do Material sem *Tapering* Tira 1.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



Esta apresentou o perfil de carga característico em laminadores *Steckel* com maiores cargas nas pontas. O perfil de carga nas pontas do material no fim do penúltimo e início do último estão demonstrados na Figura 10.

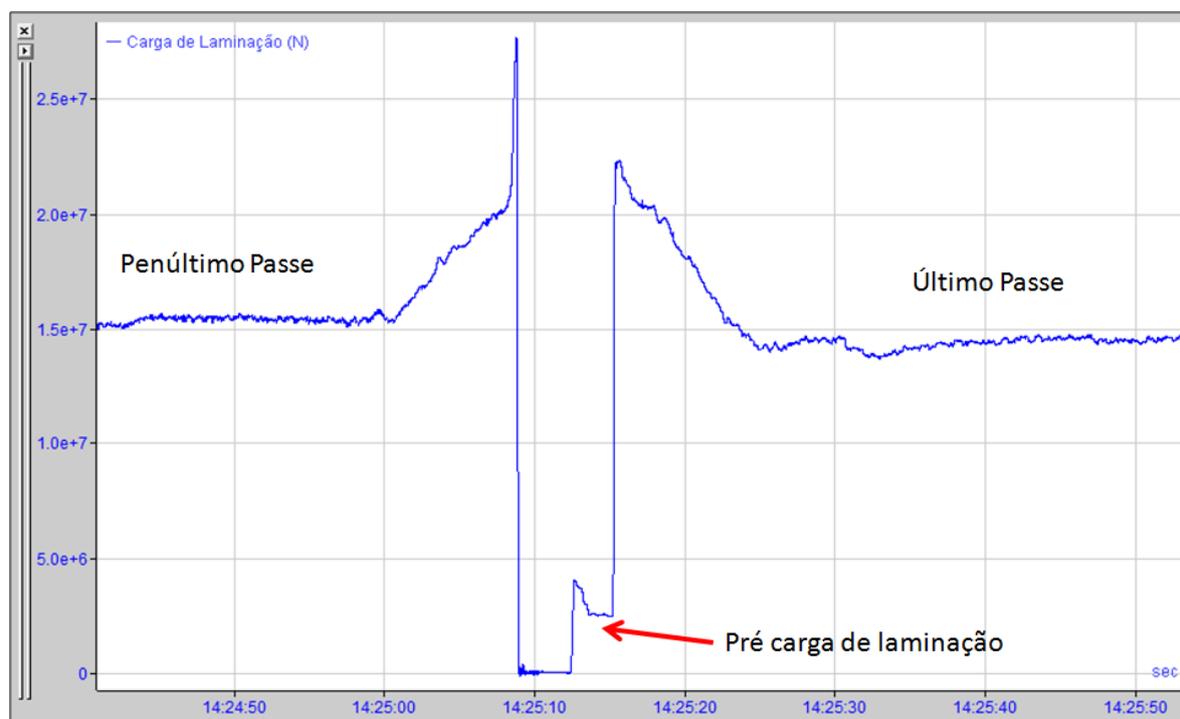


Figura 10. Perfil de Carga na Cabeça do Penúltimo Passe e Último Passe da Tira 1.

Além das cargas mais elevadas nas pontas, pode-se perceber que houve a necessidade de pré-carga de laminação para se alcançar a espessura na cabeça do material.

O perfil de planicidade da Tira 1 está demonstrado na Figura 11. Pode ser observada muita ondulação nas pontas. Isto é devido às maiores cargas aplicadas nesta região e, portanto uma maior deflexão dos cilindros de laminação quando comparado a região do corpo da tira.

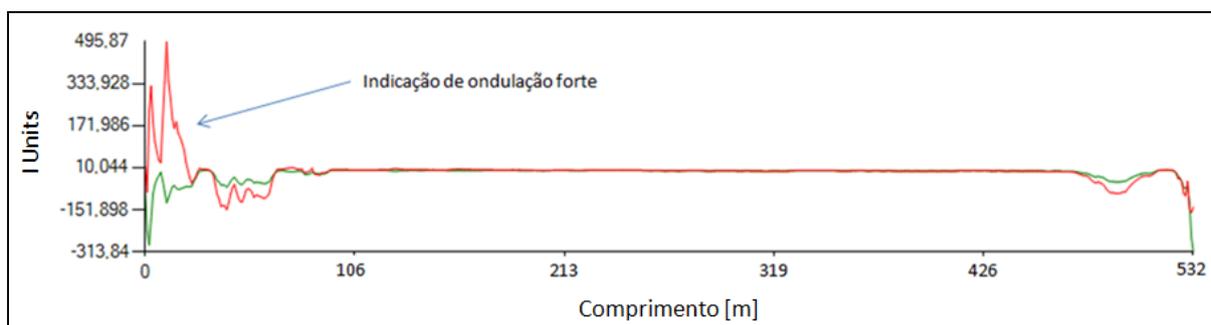


Figura 11. Resultados de Planicidade da Tira 1.

São exibidos a seguir os resultados obtidos com a utilização do *Tapering* de 300Micra na Tira 5. A distribuição da espessura realizada e calculada para o penúltimo e último passe está sendo mostrada na Figura 12.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

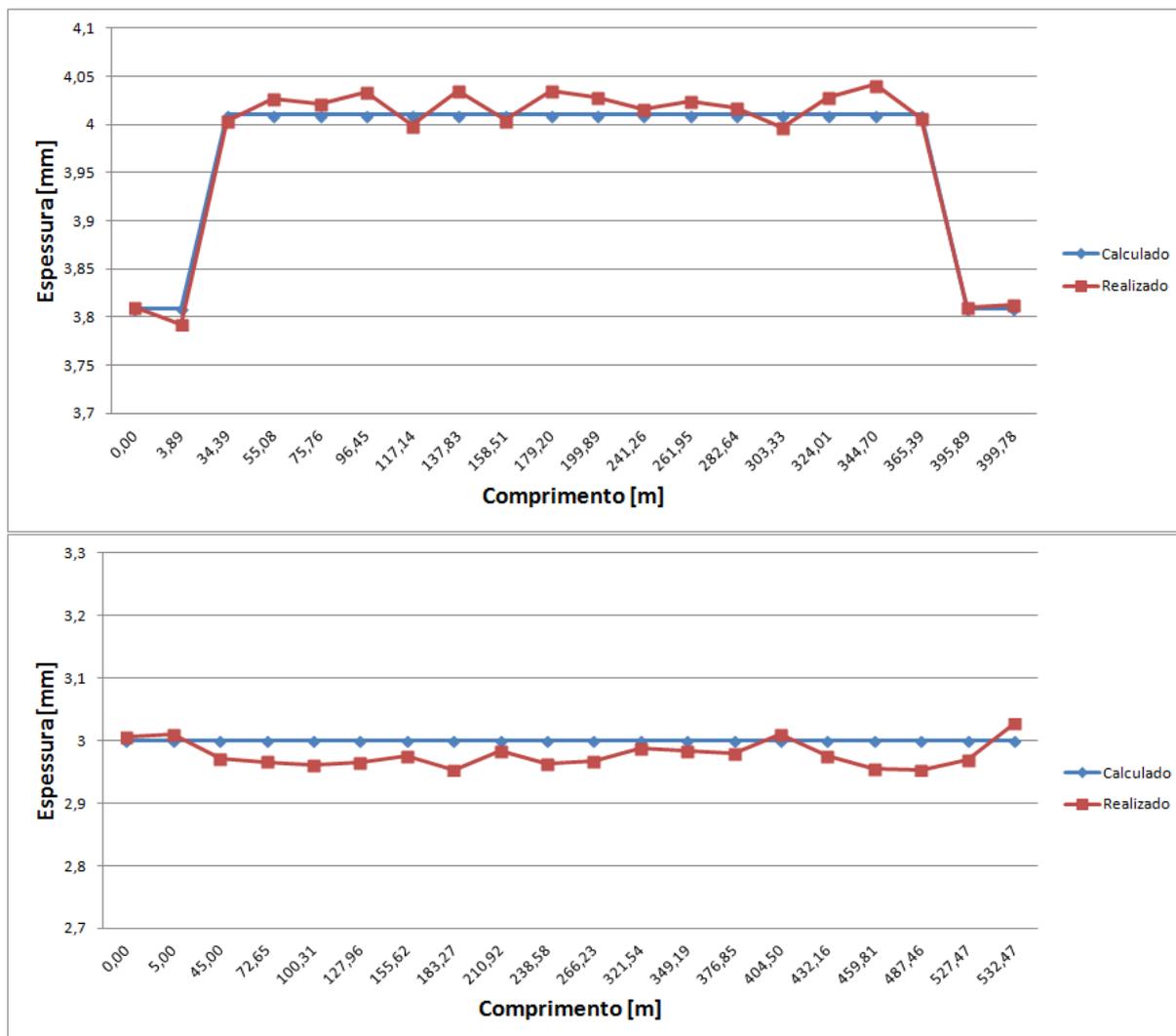
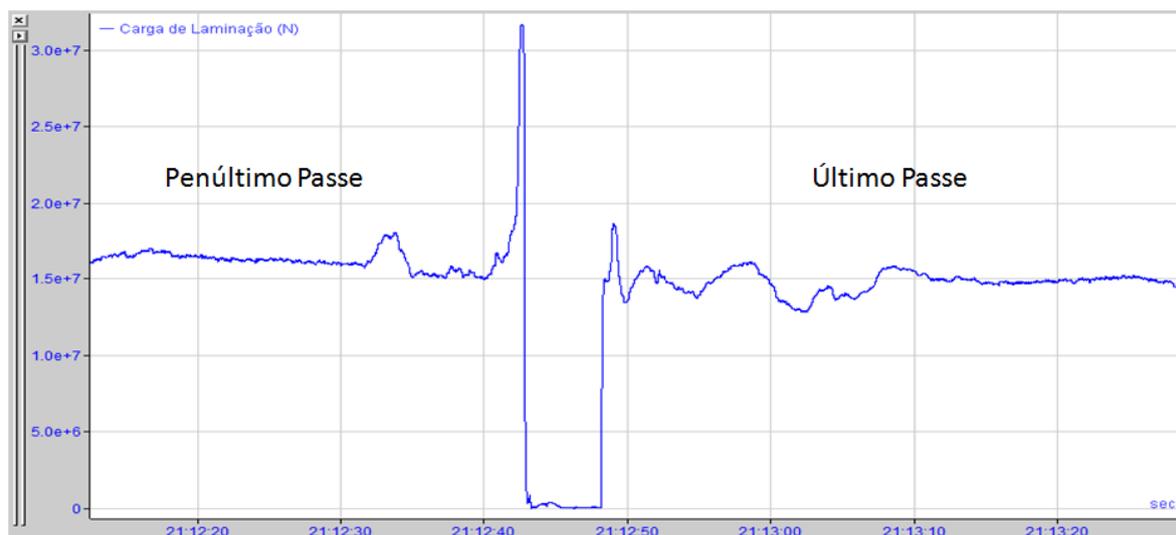


Figura 12. Aço SAE1012 3x1200mm laminado sem utilização de *Tapering*.

O *Tapering* para esta tira foi mais incisivo do que nas tiras 2, 3 e 4, gerando o perfil de carga como demonstrado na Figura 13.



* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



O pico de carga nas pontas do material não foi identificado no último passe e foi atenuado para o penúltimo passe de laminação. A atenuação ocorrida no penúltimo passe foi devido à aplicação do *Tapering* nos passes iniciais do acabamento. O resultado de planicidade obtido está demonstrado na Figura 14. Pode se perceber que o material apresentou melhor condição de planicidade com a amplitude máxima de 10 I-Units.

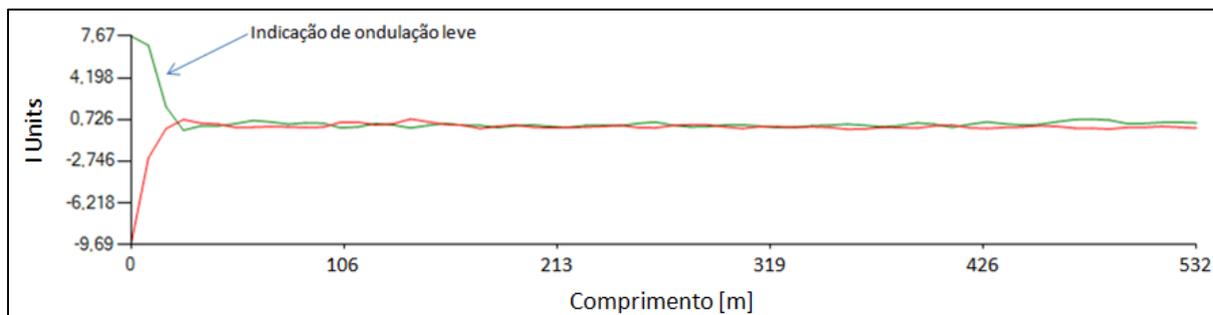


Figura 14. Resultados de Planicidade da Tira 5.

A comparação entre a carga máxima na cabeça e a carga do corpo das cinco tiras, que foram experimentadas em sequencia, está apresentada no gráfico da Figura 15. Podemos observar que a diferença de carga diminui na medida em que foi aumentada a profundidade do *Tapering*.

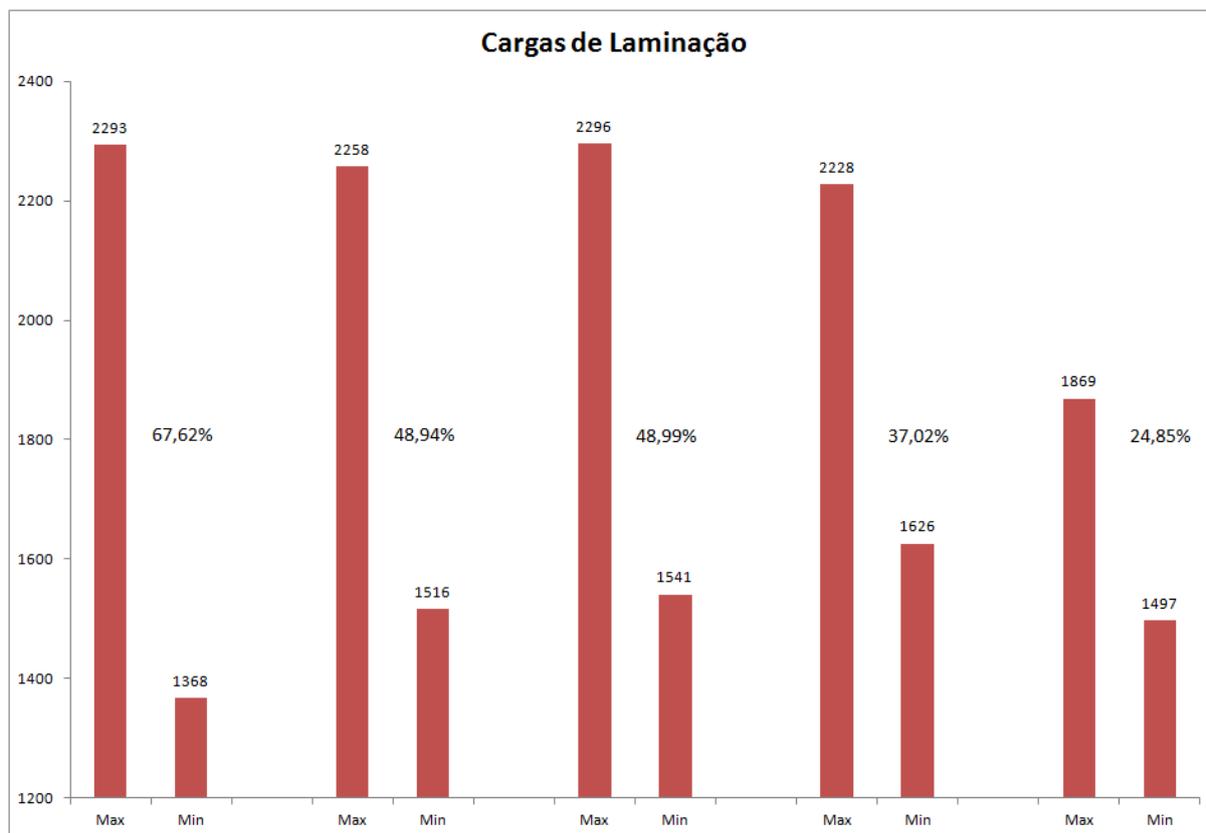


Figura 15. Gráfico Comparativo das Cargas de Laminação entre Cabeça e Corpo.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



4 CONCLUSÃO

A aplicação desta função apresentou bons resultados para o controle da planicidade do material laminado. A menor variação de carga de laminação entre as pontas do material e o corpo gerou menor necessidade de atuação do sistema *Work Roll Bending* para correção da deflexão dos cilindros.

Contribuiu também para a estabilidade de laminação de materiais menos espessos, possibilitando assim, a evolução do processamento de aços com maior largura e menor espessura, bem como a laminação de aços com maior resistência mecânica.

A aplicação do *Tapering* é baseada em comprimento e profundidade bem definidos sendo assim necessário que o controle de *tracking* do material seja apurado possibilitando a aplicação das reduções no momento correto.

A estratégia da aplicação desta função deve ser definida de forma que não gere instabilidade no processamento do aço por ultrapassar os limites de carga nas pontas dos passes anteriores.

Agradecimentos

A todos os envolvidos no desenvolvimento desta técnica essencial para evolução do mix de produção da Gerdau no portfólio de aços laminados planos.

REFERÊNCIAS

- 1 Farmer WiJ. Mr. Steckel and His Mills. International Association of Steckel Mill Operators, 1997.
- 2 Kramer S, Knepe G, Rosenthal D. Technology and Performance of Modern Steckel Mills. Iron and Steel Engineer, 1997, p.17-26.
- 3 Konovalov Yu.V, Khokhlov AS. Benefits of Steckel Mills in Rolling. Steel In Translation, 2013, 43: 206-211.
- 4 Siemens VAI. Operation Team Training for Gerdau, Sheffield. 2012.
- 5 Souza AL Estudo da Tensão Média de Escoamento de Aços Laminados em Tiras a Quente. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG; 2010.
- 6 Souza AL, Reis EG, Silveira JHD, Pereira MM. Modelos Matemáticos da Nova Linha de Laminação de Tiras a Quente da Gerdau. 50° Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos Internacional, 2013, p.274-283.
- 7 Siemens VAI. Technical Specification for Steckel Mill Plant for GERDAU Ouro Branco. 2010.
- 8 Souza AL, Borges JM, Schuwarten WJ, Pereira MM, Silveira JHD. Laminação de Tiras a Quente da Gerdau. 50° Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos Internacional, 2013: 369-380.
- 9 Sandip S, Clark M, Robinson I, Schmidt B. Latest Development of Plate and Steckel Mill Technologies. 50° Seminário De Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos Internacional, 2013, p.803-813.

* Contribuição técnica ao 51° Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.