

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

João Júnio Pereira Lino ¹
Jacson Moraes Borges ¹
Altair Lúcio de Souza ¹
John Hanna Frenn ²
Maurício Martins Pereira ¹
Willy Schuwarten Júnior ¹
Geraldo Lúcio de Faria ³

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* que consiste na aplicação de reduções maiores nas pontas da tira em comparação com o corpo. 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 that consists in applying higher reductions at the ends of the strip when in comparison with the strip body. 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.

I 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 mm. Na medida em que a espessura diminui e a largura aumenta, aumenta também a dificuldade no processamento.

¹Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Ouro Branco, Ouro Branco, MG, Brasil. E-mail: joao.lino@gerdau.com.br

²Laminação de Tiras a Quente, Primetals, Ostrava, República Tcheca.

³Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.



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].

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 este processo o material pode receber um jato de água em alta pressão, denominado 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 em etapas numeradas de 1 a 6 [4].

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 devido a exposição ao ambiente externo ao forno. Em decorrência disto ocorre um degrau na temperatura que pode chegar até a 250 °C em ambas as pontas do material [2]. Com a consequente redução na temperatura, a força de laminação ao longo do comprimento

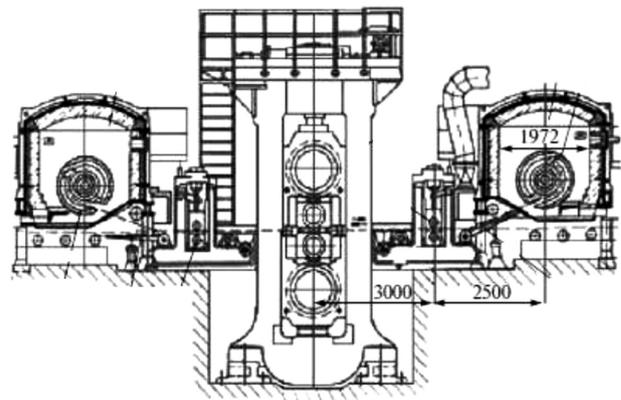


Figura 1. Laminador quádruo reversível tipo *Steckel* com fornos bobinadeira.

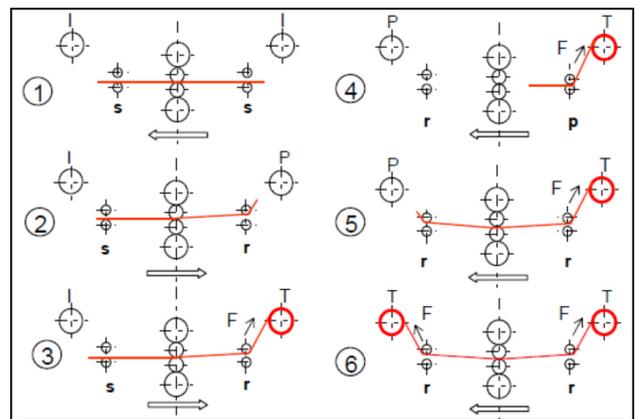


Figura 2. Processo *Steckel* em etapas de 1 a 6.

do material aumenta nas pontas. Esta característica é típica em laminadores *Steckel*, como pode ser observado na Figura 3.

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.

Quando se está laminando aços Carbono, a carepa secundária que é formada naturalmente deve 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.

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

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 melhora da forma da tira [5].

1.2 Laminador de Tiras a Quente da Gerdau

O 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 larguras entre 900 e 2100 mm [6]. O projeto

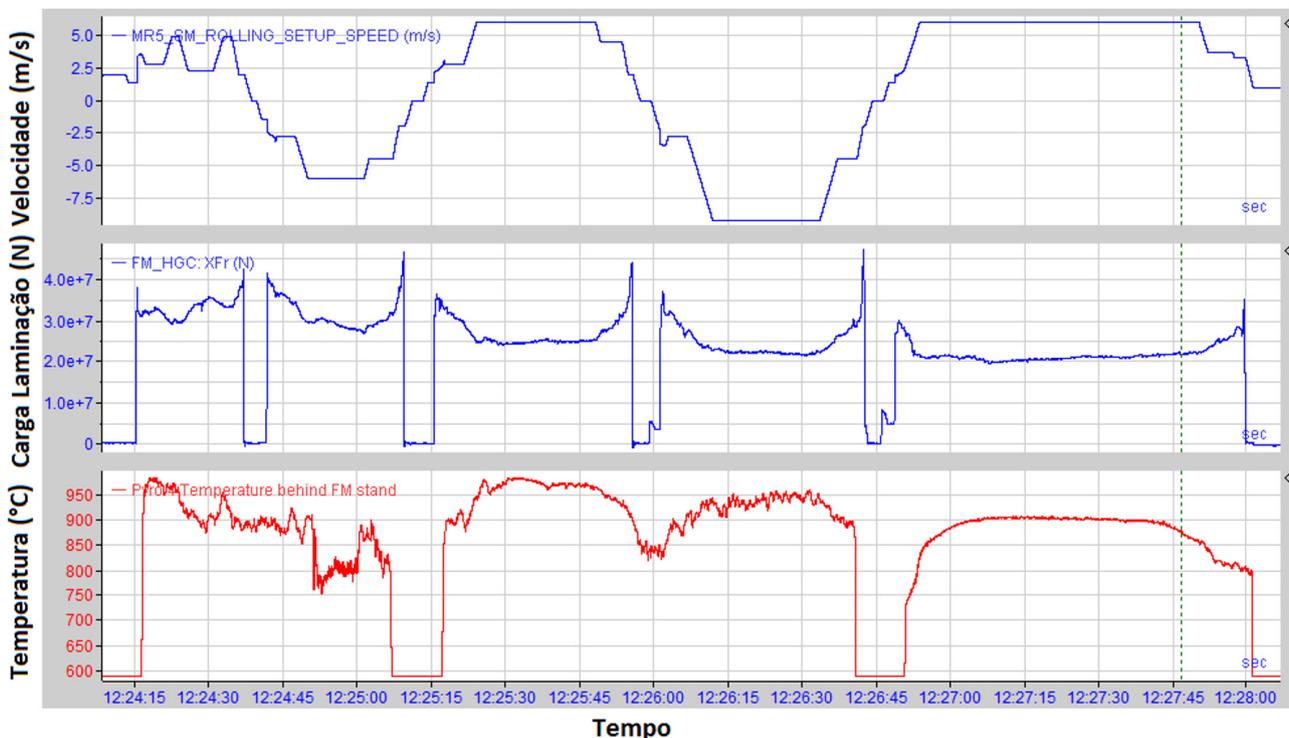


Figura 3. Dados de laminação típicos em laminadores *Steckel*.

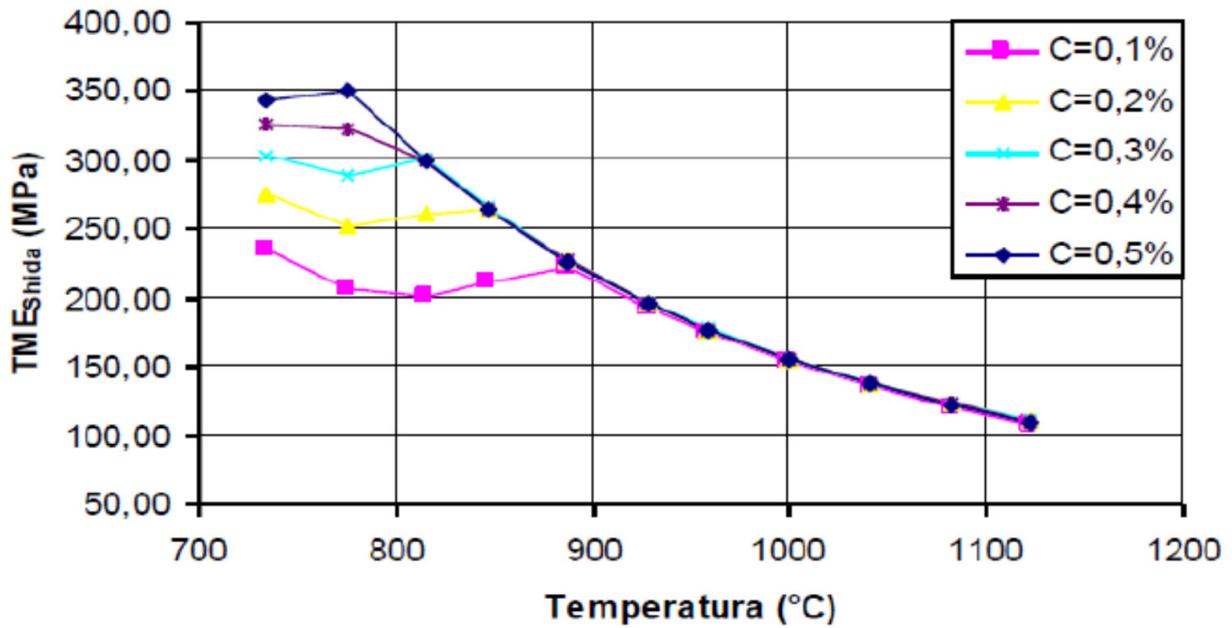


Figura 4. A evolução da TME (tensão média de escoamento) em função da temperatura para diferentes teores de carbono utilizando a equação de Shida [5].

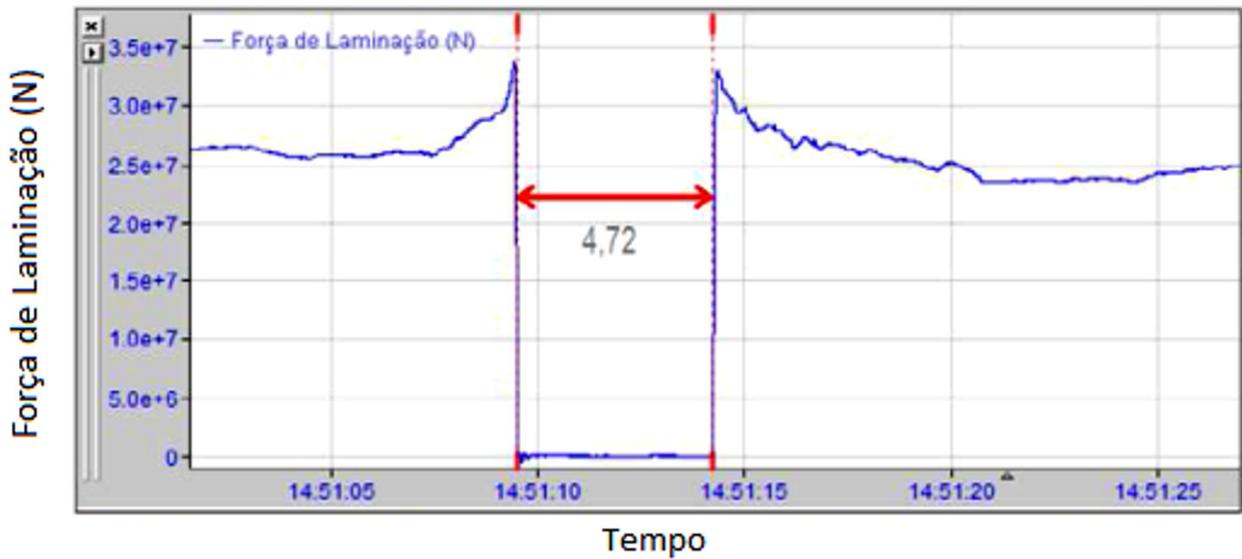


Figura 5. Tempo de reversão Steckel em 4,72 segundos.

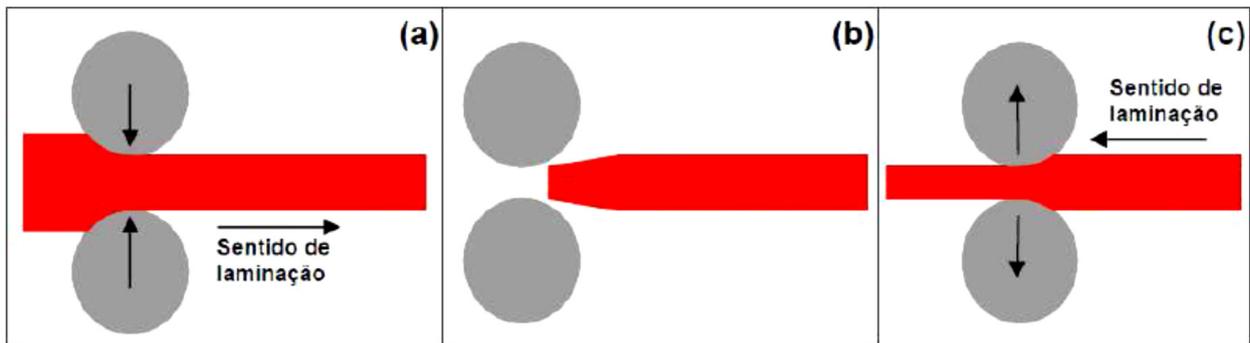


Figura 6. Desenho esquemático da função *Tapering* sendo que em (a) se inicia a aplicação do *taper*, em (b) finaliza o passe produzindo o perfil de espessura desejado e em (c) a remoção do *taper* no passe posterior.

foi concebido com as mais recentes tecnologias para controle da temperatura, dimensão e forma do laminado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

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 Gerda 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*) [7]. Este faz os cálculos destas variáveis em múltiplos *setpoints* ao longo do comprimento do laminado totalizando 20 pontos. O sistema de automação (Nível I) faz a interpolação dos *setpoints* recebidos e aplica durante o processamento do material.

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 μm de *Tapering* no penúltimo passe; na terceira 150 μm de *Tapering*. Na quarta foi aplicado 220 μm de *Tapering*; e na quinta foi aplicado 300 μm no penúltimo passe. Em todos os casos o *Tapering* foi aplicado nos últimos 30 metros. Estão sumarizados na Tabela 1 os procedimentos definidos acima.

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 2 exemplifica o procedimento descrito acima aplicado na Tira 4.

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 7. O perfil de carga nas pontas do material no fim do penúltimo e início do último está demonstrado na Figura 8.

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. A pré-carga de laminação é conseguida através

Tabela 1. Exemplo de *tapering* aplicado

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

Tabela 2. Exemplo de *Tapering* aplicado no caso número 4 da Tabela 1

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		

do fechamento dos cilindros de laminação para valores abaixo do zero obtido na calibração para quando o material for inserido no laminador ocorra à deformação elástica da cadeia resultando na espessura desejada na cabeça do material.

O perfil de planicidade da Tira 1 está demonstrado na Figura 9. Pode ser observada muita ondulação nas pontas. Isto é devido às maiores cargas aplicada nesta região e, portanto uma maior deflexão dos cilindros de laminação quando comparado à região do corpo da tira.

São exibidos a seguir os resultados obtidos com a utilização do *Tapering* de 300 μm na Tira 5. A distribuição da espessura realizada e calculada para o penúltimo e último passe está sendo mostrada na Figura 10.

O *Tapering* para esta tira foi mais incisivo do que nas tiras 2, 3 e 4, gerando o perfil de carga apresentado na Figura 11.

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 12. Pode se perceber que o material apresentou melhor condição de planicidade com a amplitude máxima de 10 *I-Units*.

Foi feita a comparação das cargas obtidas nas pontas e corpo do material na qual foi verificada que a condição sem *tapering* utilizada na tira 1 apresentou uma relação de 67,62% enquanto na tira 5 foi encontrada uma relação de 24,85%. Podemos observar que a diferença de carga entre as pontas e o corpo do material diminui na medida em que foi aumentada a profundidade do *Tapering*.

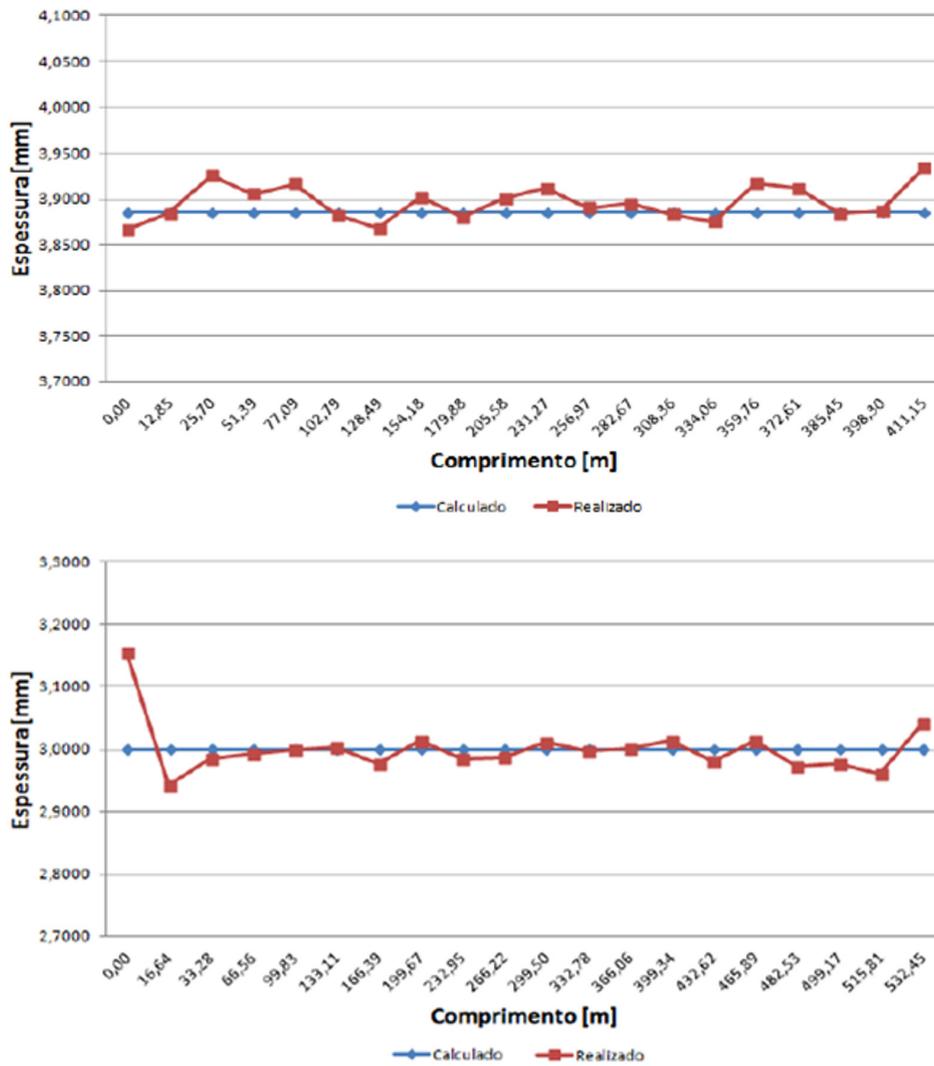


Figura 7. Múltiplos setpoints do penúltimo (acima) e último passe (abaixo) de laminação do material sem *Tapering* tira I da Tabela I.

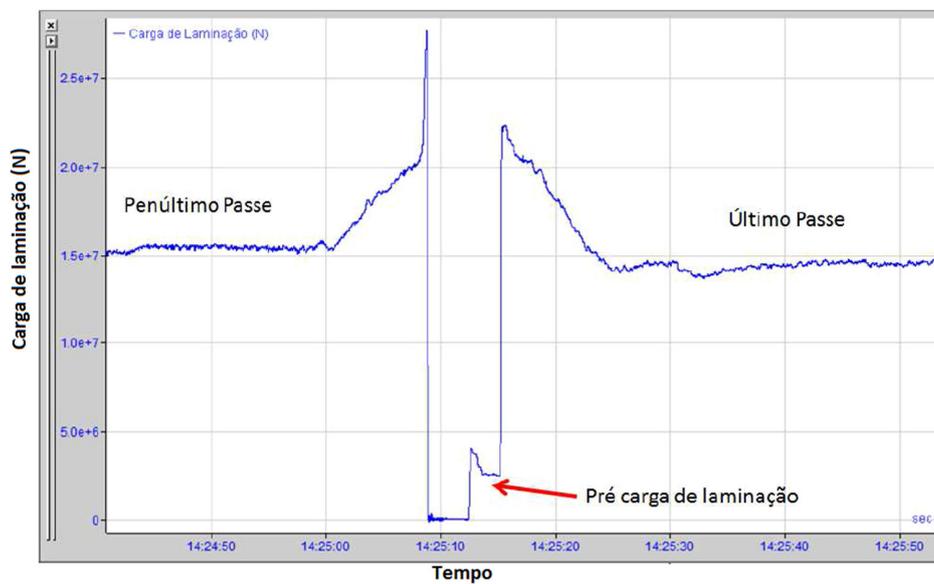


Figura 8. Perfil de carga na cabeça do penúltimo passe e último passe da tira I da Tabela I.

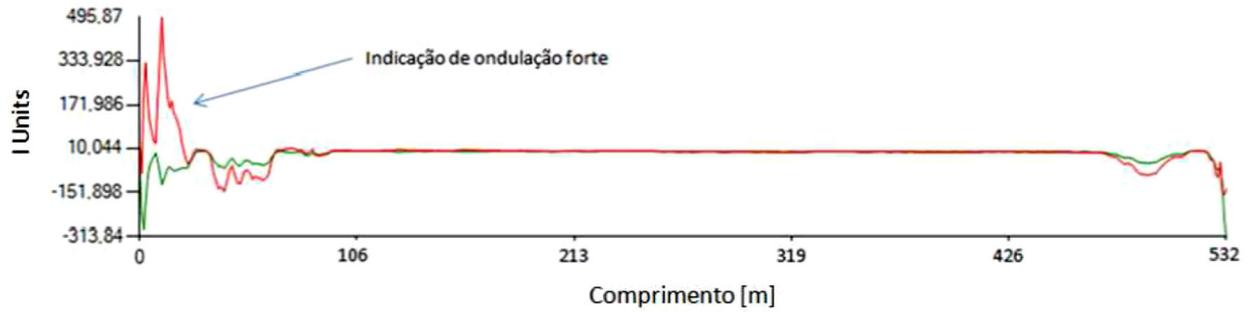


Figura 9. Resultados de planicidade da tira I da Tabela I (ondulação simétrica em vermelho e em um lado somente verde).

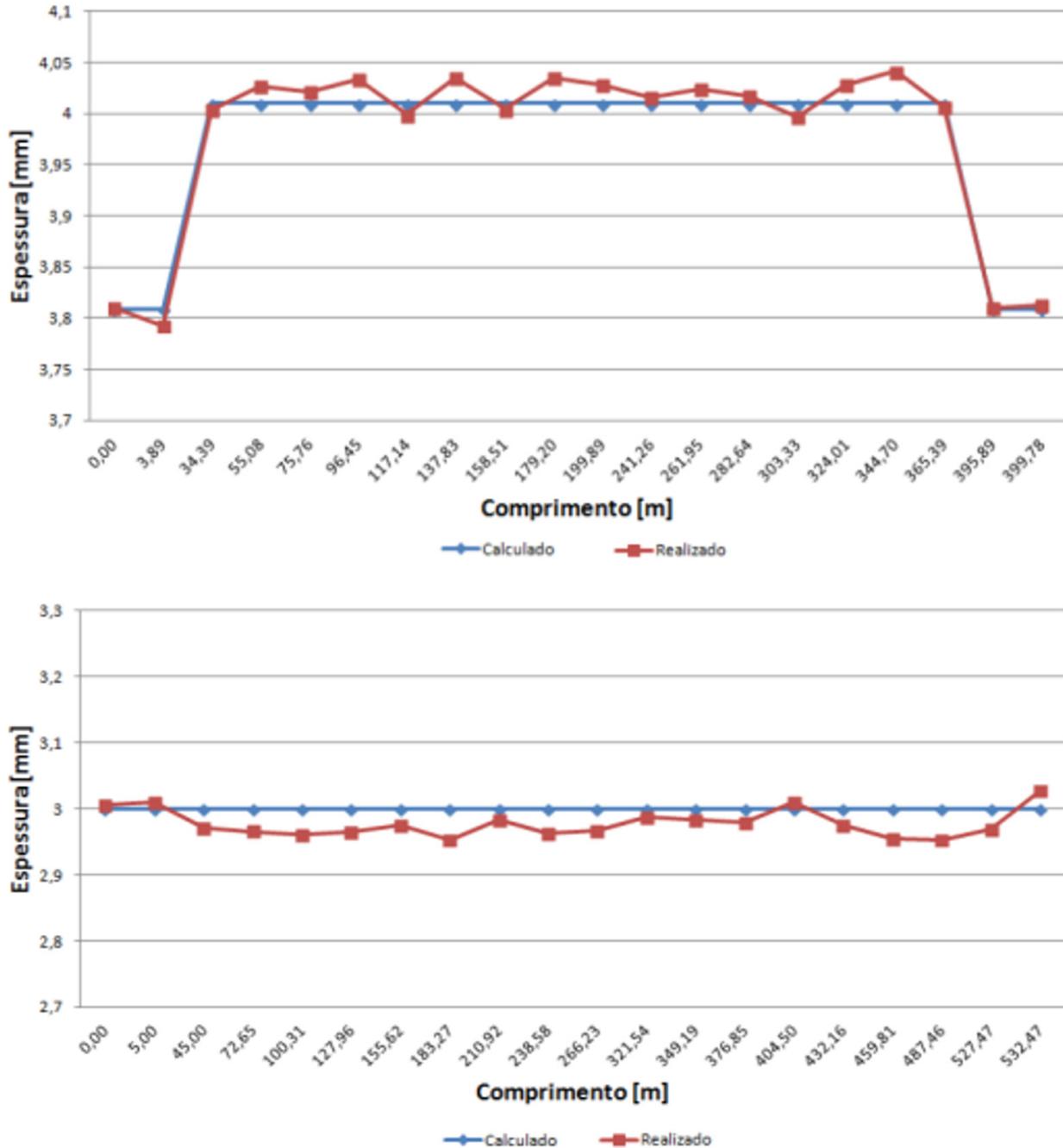


Figura 10. Múltiplos setpoints do penúltimo (acima) e último passe (abaixo) de laminação do material com *Tapering* tira 5 da Tabela I.

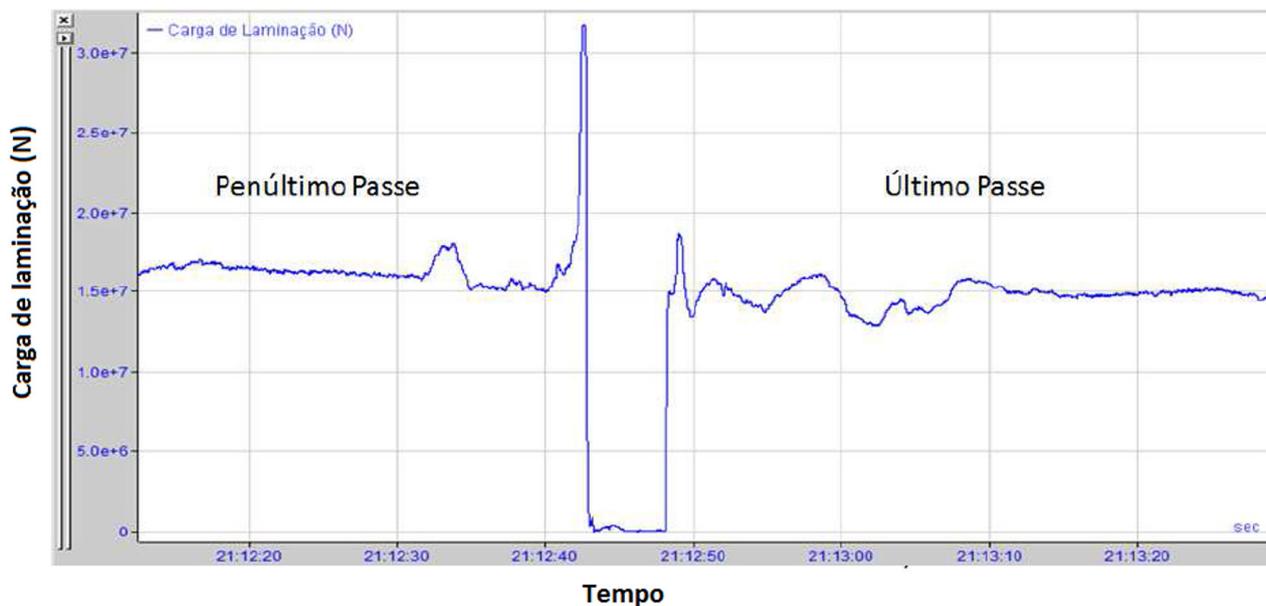


Figura 11. Perfil de carga na cabeça do penúltimo passe e último passe da tira 5 da Tabela 1.

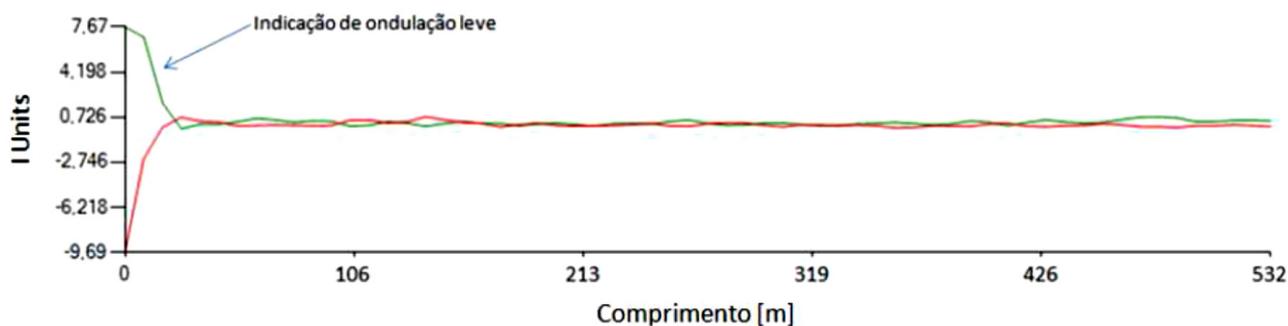


Figura 12. Resultados de planicidade da tira 5 da Tabela 1 (ondulação simétrica em vermelho e em um lado somente verde).

4 CONCLUSÃO

A aplicação desta função apresentou bons resultados para o controle da planicidade nas pontas 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 correta aplicação da função depende da aplicação dos setpoints de *gap* no momento correto bem como a profundidade para não causar instabilidade de laminação.

REFERÊNCIAS

- 1 Farmer WIJ. Mr. Steckel and his Mills. IASMO Seminar China: Introduction of the International Association of Steckel Mill Operators; 1997.
- 2 Kramer S, Kneppel G, Rosenthal D. Technology and performance of modern Steckel mills. Iron and Steel Engineer. 1997;1997(7):17-26.
- 3 Konovalov YV, 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/Universidade Federal de Minas Gerais; 2010.
- 6 Siemens VAI. Technical specification for Steckel mill plant for Gerdau Ouro Branco. 2010.
- 7 Souza AL, Reis EG, Silveira JHD, Pereira MM. Modelos matemáticos da nova linha de laminação de tiras a quente da gerdau. Anais do 50º Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos Internacional; 2013 Nov 18-21; Ouro Preto, Brasil. São Paulo: ABM; 2013, p. 274-283.

Recebido em: 5 Nov. 2015

Aceito em: 29 Abr. 2016