

# DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE MORDENTE DE MANDRIL DE LAMINADOR SENDZIMIR<sup>1</sup>

Antônio Carlos Ataíde<sup>2</sup>  
 Antônio Eustáquio de Melo Pertence<sup>3</sup>  
 Paulo Roberto Cetlin<sup>4</sup>

## Resumo

Neste trabalho, é apresentado o desenvolvimento de uma metodologia para avaliação da capacidade de mordente de mandril de laminador a frio tipo Sendzimir. O mordente tem a função de prender a ponta da tira no início do processo de bobinamento, a fim de permitir a aplicação da tração. A metodologia consiste no desenvolvimento de modelos físicos construídos próximo da escala real, os quais foram submetidos a ensaios experimentais, com a finalidade de identificar a máxima tração de bobinamento em função do arco de contato da tira com uma superfície cilíndrica similar ao mandril do laminador. O objetivo principal é avaliar a capacidade dos mordentes, tendo-se em vista a aplicação de tração com menos de uma volta de tira enrolada no mandril. A metodologia foi aplicada em três casos experimentais, onde se utilizaram os segmentos dos mandris de três laminadores da Aperam South America. Esse estudo foi aplicado no laminador nº 3 (LB3) no mês de Junho/11, onde foi possível reduzir o comprimento de ponta grossa, através do enrolamento de tira no mandril, de 1/2 volta nos aços 430 e 3/4 de volta para os demais aços. Essa mudança no LB3 possibilitou uma redução no sucatamento de 1070 t/ano.

**Palavras-chave:** Laminador; Bobinadeira; Mandril; Mordente.

## DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A METHODOLOGY FOR EVALUATION OF THE CAPACITY OF THE MANDREL GRIPPER OF SENDZIMIR COLD MILL

### Abstract

In this work the development of a methodology is presented for evaluation of the capacity of the mandrel gripper of Sendzimir cold rolling mill. The gripper has the function to fasten the strip at the beginning of the winding process, in order allow the application of tension. The methodology consists of the development of physical models built near real scale, which were submitted to experimental tests, aiming at identifying the maximum tension winding as a result of the contact arc of the strip with a cylindrical surface similar to that of the rolling mill mandrel. The main objective of this work is to evaluate the capacity of the mandrel grippers keeping in mind the application of tension with less than a turn of the strip wound up onto the mandrel. The methodology was applied in three experimental cases in which mandrel segments from three rolling mills of Aperam South America were used. This study was applied to the mill 3 in June/11, where it was possible to reduce the length of heavy gauge, by winding the strip on the mandrel, 1/2 turn in the 430 steel and 3/4 for the other types of steels. That change in LB3 enabled a reduction of scrap volume of 1070 t/year.

**Key words:** Mill; Winding; Mandrel; Gripper.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 49º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 22 a 25 de outubro de 2012, Vila Velha, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro de Manutenção - Aperam South America.

<sup>3</sup> Professor associado do departamento de Engenharia Mecânica - UFMG.

<sup>4</sup> Professor titular do departamento de Engenharia Mecânica - UFMG.

## 1 INTRODUÇÃO

A laminação a frio da Aperam South America é realizada em laminadores tipo Sendzimir. Por serem reversíveis e exigirem elevadas trações, as pontas das bobinas permanecem presas aos mandris das bobinadeiras durante o processo. Estas pontas não são, portanto, laminadas e conservam a espessura e o acabamento superficial originais da matéria-prima. No processo de recozimento final, são descartadas e sucataadas como ponta grossa ou *heavy gauge*, constituindo a principal perda de rendimento físico do processo.

Na Aperam South America a prática atual de bobinamento considera que a aplicação da tração somente pode ser iniciada após pelo menos 1,5 volta de tira no mandril, conforme recomendado nos manuais dos equipamentos.<sup>(1,2)</sup>

Neste trabalho, desenvolveu-se uma metodologia para avaliação da capacidade de mordente de mandril de laminador Sendzimir, tendo-se em vista a aplicação de tração com menos de uma volta de tira enrolada no mandril. A metodologia foi aplicada em três casos experimentais, onde se utilizaram os segmentos dos mandris de três laminadores da Aperam South America, LB1, LB3 e LB4<sup>(\*)</sup>.

Foram desenvolvidos dois dispositivos, um para medição da tração diretamente aplicada no mordente e outro para medição da tração considerando-se também o arco de contato entre a tira e uma superfície cilíndrica com diâmetro igual ao do mandril (610 mm).

Desenvolveu-se também um modelo analítico, tendo como base a conformação de tira metálica sobre uma superfície cilíndrica para cálculo da tração de bobinamento, a fim de se validarem os resultados obtidos no modelo físico.

Realizou-se uma alteração no projeto do mordente do LB3, cuja implantação ocorreu no mês de Junho/2011, onde foi possível reduzir o comprimento de ponta grossa, através do enrolamento de tira no mandril, de 1/2 volta nos aços 430 e 3/4 de volta para os demais aços. Essa mudança possibilitou uma redução na geração de ponta grossa, da ordem de 90 t/mês.

### 1.1 Bobinadeira de Laminador Sendzimir

As bobinadeiras têm a função de enrolar a bobina sobre um mandril, na tração adequada ao processo. As bobinadeiras são dotadas de acionamento através de motor acoplado a um redutor de engrenagens e mandris expansivos. A Figura 1 apresenta um modelo típico de uma bobinadeira utilizada em laminadores Sendzimir.



Figura 1. Bobinadeira de laminador Sendzimir.<sup>(3)</sup>

<sup>(\*)</sup> Siglas utilizadas para identificação dos laminadores

## 1.1.1 Mandril da bobinadeira

Mandris modernos utilizados em laminadores Sendzimir são equipados com mecanismos chamados de mordente, que têm a função de prender a extremidade da tira, a fim de se iniciar o bobinamento.<sup>(4)</sup> Esse mecanismo é montado em um dos quatro segmentos do mandril e é composto por réguas, que são atuadas por pressão hidráulica proveniente do cilindro rotativo de expansão. A Figura 2 (a) apresenta uma vista de corte do mandril, com o detalhe da localização do mordente, e a Figura 2 (b) mostra um modelo típico de mordente utilizado nos mandris.

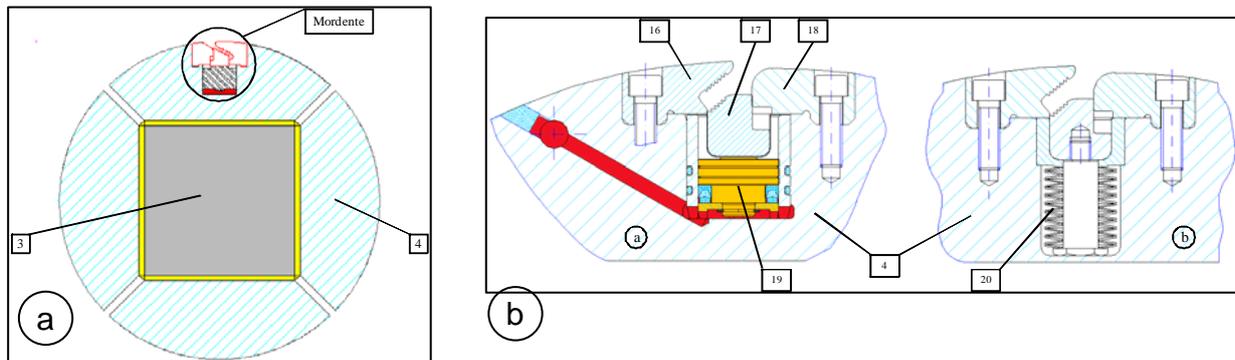


Figura 2. a) Seção transversal do mandril, b) Detalhe do mordente.

Através da Figura 2(a), observa-se que a pressão hidráulica atua na superfície inferior do pistão 19, promovendo o deslocamento da régua móvel 17 contra a régua fixa 16. O retorno da régua móvel ocorre no momento em que o mandril é contraído, quando a alimentação hidráulica para o mordente é desativada. Assim, o conjunto de molas 20 força a régua móvel para baixo, conforme mostrado na Figura 2(b).

### 1.1.1.1 Projetos de mordente do LB1, LB3 e LB4

Os projetos de mordente dos mandris dos laminadores de inox da Aperam South America apresentam grande similaridade, conforme mostrado nas Figuras 3, 4 e 5.

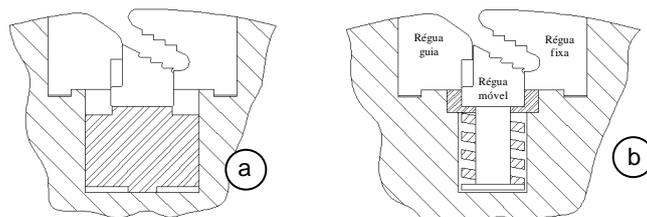


Figura 3. a) Acionamento hidráulico do mordente do LB1, b) Retorno da régua por mola.

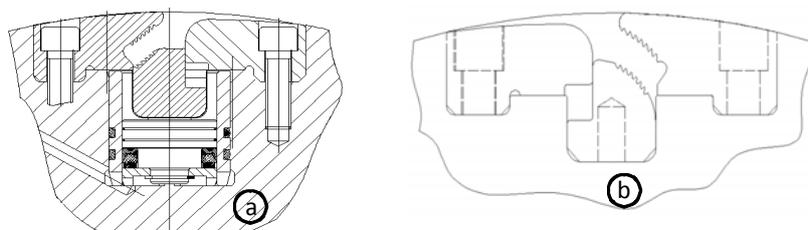


Figura 4. a) Projeto original do mordente do LB3, b) Projeto revisado do mordente do LB3.

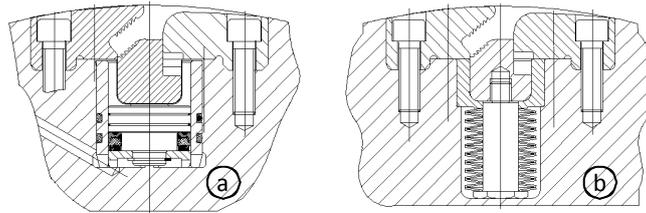


Figura 5. a) Acionamento hidráulico do mordente do LB4, b) Retorno da régua por mola.

A Tabela 1 apresenta as principais características dos projetos.

Tabela 1. Dados técnicos dos mordentes dos três laminadores

Equip.	Nº de pistões (n)	Ø pistão d [mm]	Área dos pistões $A_t$ [cm <sup>2</sup> ]	Pressão hidr. do mordente P [bar]	Comp. C régua móvel [mm]	Inclinação da régua móvel $\beta$
LB1	4	63,5	126,7	100	800	25°
LB3	10	45	159	150	1710	40°
LB4	8	45	127	140	1310	40°

No ano de 2002, foi implantada uma modificação no mordente do LB3, visando-se melhorar a concordância da tira na saída do mordente e reduzir a variação da tração de bobinamento. Tal modificação consistiu na mudança dos perfis das réguas móvel e fixa. A Figura 4(a) apresenta o projeto original; a Figura 4(b), o projeto modificado. Foi identificada uma não conformidade no projeto modificado especificamente na régua móvel do mordente. Observando-se a Figura 4(b), percebe-se que os dentes da régua ficaram em posição invertida, com inclinação favorável à saída da tira.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Avaliação da Capacidade dos Mordentes

Os mordentes dos mandris do LB1, LB3 e LB4 foram avaliados quanto à capacidade de máxima tração aplicada na tira na condição de tração direta, com a tira alinhada com as superfícies de mordedura das réguas, conforme mostrado na Figura 6.

Os outros testes consistiram na medição de máxima força de tração aplicada na tira, com a mesma enrolada no mandril, formando arcos de contato de:  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$ ,  $\theta = 180^\circ$ ,  $\theta = 270^\circ$  e  $\theta = 315^\circ$ , como mostrado na Figura 7. O ângulo de  $\theta = 0^\circ$  representa a tira conformada apenas na saída do mordente. Essa posição foi escolhida tendo-se em vista verificar a contribuição do dobramento da tira sobre a régua guia na tração de bobinamento.

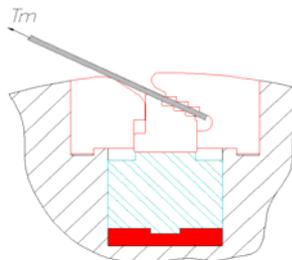


Figura 6. Detalhe da aplicação de tração direta.

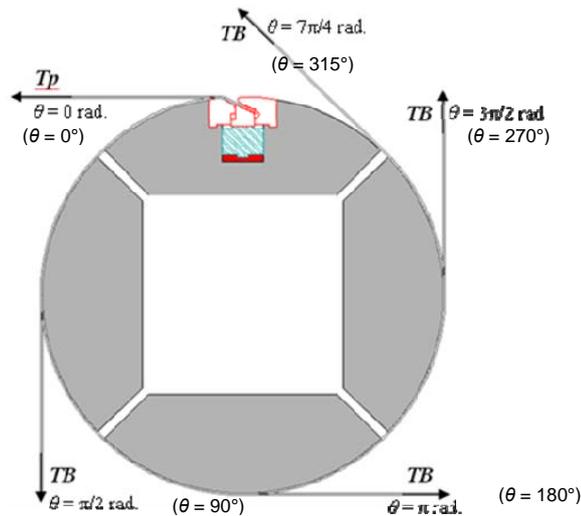


Figura 7. Tração na tira com arco de contato.

### 2.1.1 Modelo físico

Para execução dos testes, foram desenvolvidos dois dispositivos. Estes dispositivos foram projetados de forma a obter uma cópia física dos mandris dos laminadores, próximos da escala real, onde se utilizam os próprios segmentos em que são montados os mordentes para realização dos experimentos. Eles constam dos seguintes componentes:

- componentes estruturais, para sustentar o segmento que contém o mordente e o cilindro hidráulico;
- garra, para conectar a tira à célula de carga;
- célula de carga de tração de capacidade de 5 t., para medir a tração na tira;
- cilindro hidráulico de 140 mm x 85 mm x 85 mm, para tracionar a tira;
- indicador de força, para aquisição dos dados medidos pela célula de carga;
- duas unidades hidráulicas, sendo uma para alimentação do mordente e outra para o cilindro hidráulico de tração, equipadas com sensores de pressão;
- sensor de posição ultrassônico, para medição do deslocamento da tira; e
- sistema de aquisição capaz de registrar e analisar os dados coletados.

O dispositivo apresentado na Figura 8 é utilizado para medição da capacidade do mordente diante do esforço de tração na tira. Para isso, o segmento do mandril é posicionado de forma que a tira, após ser presa no mordente, fique alinhada com o cilindro hidráulico, conforme detalhe na parte inferior da Figura 8. A outra extremidade da tira é presa a uma garra por quatro parafusos; por sua vez, está conectada à célula de carga responsável pela medição de força; para aplicação da força, é utilizado um cilindro hidráulico, que também está ligado à célula de carga e fixado na estrutura do dispositivo.

O outro dispositivo, mostrado na Figura 9 (a), é também utilizado para medição da capacidade do mordente, mas considerando-se o abraçamento da tira na luva de aço que representa o mandril do laminador em escala real ( $\varnothing$  610 mm). Nesta luva de aço estrutural, é preso o segmento que contém o mordente, completando o perfil cilíndrico, conforme mostra a Figura 9 (b). Com esse dispositivo, é possível avaliar a influência do arco de contato, do atrito e da flexão da tira na capacidade de bobinamento.

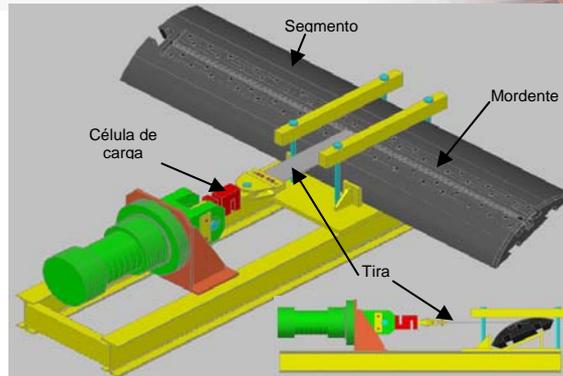


Figura 8. Dispositivo para medição de tração direta.

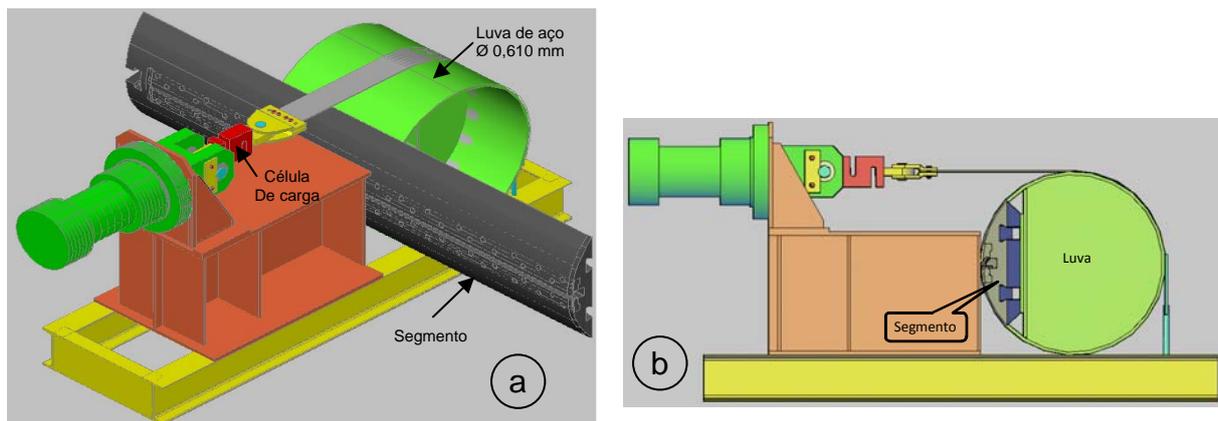


Figura 9. a) Dispositivo para medição de tração com arco de contato, b) Vista lateral do dispositivo.

## 2.1.2 Materiais

Avaliaram-se as tensões específicas máximas geradas com a aplicação de tração na tira em cada laminador e definiu-se pela utilização de tiras metálicas de aço inoxidável AISI 304 laminadas a quente, recozida, decapada mecânica e quimicamente, com espessura de 2,85 mm e largura de 100 mm.

Para o dispositivo de tração direta, utilizaram-se tiras com comprimento de 410 mm. As tiras utilizadas no dispositivo de tração com arco de contato foram cortadas com comprimentos variados entre 440 mm e 2.100 mm. A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas do material obtidas através do ensaio de tração.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico – AISI 304

Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento 0,2% (MPa)	Alongamento Percentual (%)	Dureza (HRB)
709,16	363,47	50,6	89

## 2.1.3 Modelo analítico para tração de bobinamento

A força de mordedura ou força do mordente ( $F_M$ ) foi definida avaliando-se as dimensões dos três projetos em estudo, bem como a pressão hidráulica de alimentação dos pistões. Essa força foi considerada como uma carga distribuída ao longo do comprimento da régua móvel e foi definida utilizando-se a EQ. (1).

$$F_M = \frac{(n \cdot P \cdot A_p) - F_r}{C} \quad (1)$$

onde  $n$  é o número de pistões,  $P$  é a pressão hidráulica utilizada em cada projeto,  $A_p$  é a área do pistão,  $F_r$  é a força resistente, que é composta pela soma das forças de

mola  $F_m$  e de atrito  $F_a$  entre a régua móvel e as guias do segmento, ambas contrárias à força de mordedura e  $C$  é o comprimento da régua móvel.

Nesse modelo, a força ( $T_m$ ), indicada na Figura 6, foi obtida através de medições realizadas no dispositivo de tração direta.

O processo de bobinamento envolve dupla conformação da tira (tração e dobramento), uma na saída do mordente e outra sobre o mandril. A tração para a saída do mordente pode ser expressa conforme indicado na EQ. (2).

$$T_p = (T_m + \Delta T_m). \exp(\mu\varphi) \quad (2)$$

onde  $T_p$  é a tração com  $\theta = 0^\circ$ ,  $\varphi$  é o arco de contato da tira com a régua guia e  $\Delta T_m$  é a força de dobramento da tira sobre o raio  $r$  da régua guia, que é obtida pela expressão indicada na EQ. (3).<sup>(5)</sup>

$$\Delta T_m = \frac{\sigma_y \cdot T_m \cdot L}{4\eta(r/t_o)} \left[ 1 + \left( \frac{T_m}{\sigma_y \cdot t_o \cdot L} \right)^2 \right] \quad (3)$$

onde  $\sigma_y$  é o limite de escoamento,  $t_o$  e  $L$  são respectivamente a espessura e largura da tira e  $\eta$  é um fator de eficiência. Logo, a tração de bobinamento  $T_B$  pode ser expressa pela EQ. (4).

$$T_B = (T_p + \Delta T_p). \exp(\mu\theta) \quad (4)$$

onde  $\theta$  é o arco de contato da tira sobre o mandril e  $\Delta T_p$  é a força necessária para dobrar a tira sobre a superfície do mandril de raio  $R$ , conforme indicado na EQ. (5).

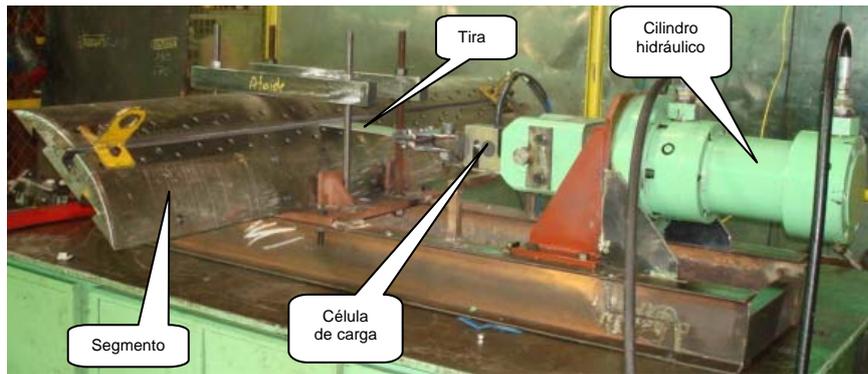
$$\Delta T_p = \frac{\sigma_y \cdot T_p \cdot L}{4\eta(R/t_o)} \left[ 1 + \left( \frac{T_p}{\sigma_y \cdot t_o \cdot L} \right)^2 \right] \quad (5)$$

#### 2.1.4 Execução dos testes de tração direta

A medição da máxima força de tração diretamente aplicada na tira tem como objetivo verificar a resposta do modelo, bem como identificar a curva de tendência, visando-se a extrapolação dos valores de força para larguras reais de processo. Nesse caso, foram utilizadas tiras com larguras de 50 mm, 100 mm e 150 mm. Tem também o objetivo de fornecer valores de força para simulação da tração de bobinamento no modelo analítico.

Os segmentos foram montados no dispositivo de tração direta, de modo a permitir o alinhamento da tira com as régua, conforme mostrado na Figura 10.

Foi feita limpeza nas régua e nas tiras com Thinner 3500, montagem de uma extremidade da tira na garra que fica acoplada à célula de carga, e a outra ponta da tira foi introduzida na abertura do mordente.



**Figura 10.** Montagem do dispositivo de tração direta.

A medida da força de mola ( $F_m$ ), somada à força de atrito ( $F_a$ ), foi definida através da medição da pressão hidráulica necessária para deslocar a régua móvel até a eliminação da folga entre a régua móvel, tira e régua fixa, de forma que a pressão de contato entre réguas e tira seja mínima. A força resistente ( $F_r$ ) foi encontrada através do produto da pressão hidráulica ( $P_m$ ) necessária para deslocar a régua móvel, até encostar na tira, da área ( $A_p$ ) e do número de pistões ( $n$ ), conforme indica a EQ. (6).

$$F_r = n.P_m.A_p \quad (6)$$

Uma vez encontrada a força do mordente ( $F_M$ ) em função do comprimento da régua, definiu-se a pressão de alimentação dos pistões ( $P$ ) através da EQ. (7).

$$P = \frac{F_M.L}{A_p.n} + P_m \quad (7)$$

onde  $L$  é a largura da tira e  $P_m$  é a pressão hidráulica necessária para vencer  $F_m$  e  $F_a$ .

A unidade hidráulica de alimentação do cilindro de tração foi ajustada para pressão máxima de 100 bar e, tendo-se em vista maior aproximação da condição industrial, foi utilizada uma válvula redutora de pressão proporcional, a fim de se manter a mesma rampa de força aplicada no início do bobinamento da tira nos laminadores. Como fonte de alimentação da válvula redutora, utilizou-se uma unidade eletrônica equipada com cartão específico, regulado para uma rampa de força de 4,3 kN/s.

Durante os testes, foi coletado simultaneamente o valor da pressão hidráulica de alimentação do cilindro de tração, a força medida pela célula de carga e o deslocamento da tira. Essas variáveis foram registradas pelo sistema de aquisição de dados IbaAnalyser® e analisadas através do software Excel®.

Foram realizados três testes para cada largura de tira; para cada teste, foi utilizada uma nova amostra.

### 2.1.5 Execução dos testes de tração com variação do arco de contato

Os segmentos foram fixados na luva de aço de diâmetro igual aos dos mandris dos laminadores, que, por sua vez, foi posicionada no dispositivo, de acordo com o arco de contato selecionado para teste. A Figura 11 mostra a montagem do dispositivo.



Figura 11. Dispositivo para medição de tração com arco de contato.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Medição de Tração Direta

A Figura 12 apresenta os resultados das medições de tração direta realizadas com os projetos dos três laminadores.

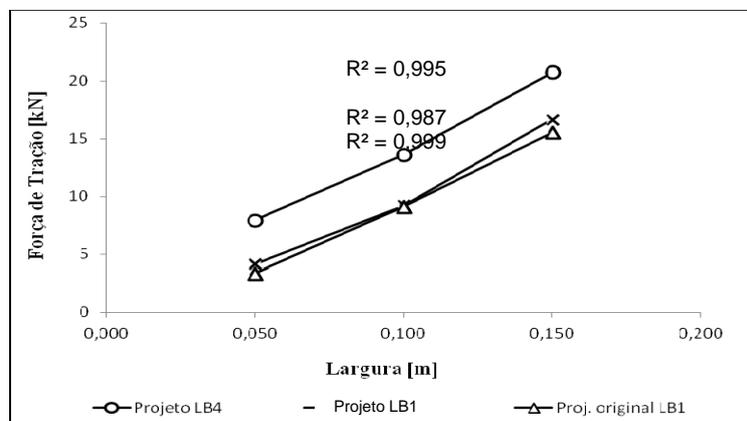


Figura 12. Tração direta x largura de tira.

### 3.2 Medição de Tração de Bobinamento

A Figura 13 apresenta os resultados dos cálculos analíticos, bem como das medições de tração de bobinamento, realizadas com os projetos do LB1 e LB4.

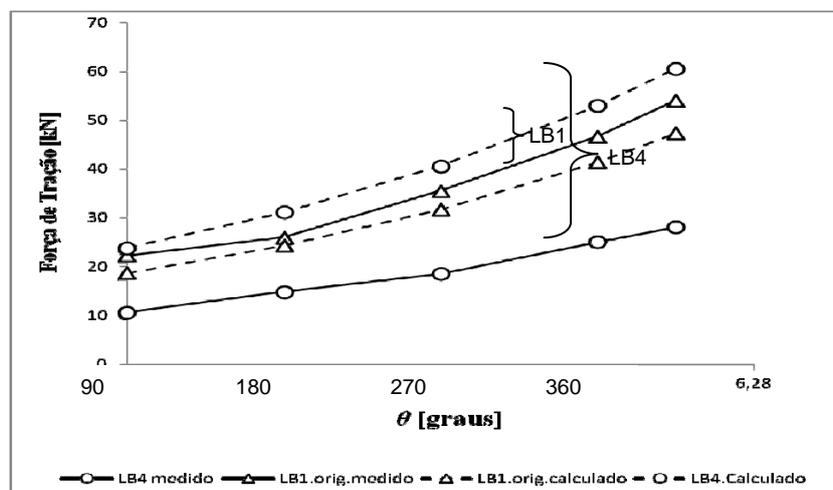


Figura 13. Tração de bobinamento medida e calculada para os projetos do LB1 e LB4.

## 4 DISCUSSÃO

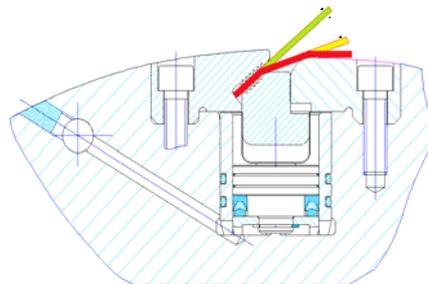
Uma análise comparativa das Figuras 12 e 13 resultam nos seguintes comentários e afirmações:

Comparando-se os coeficientes  $R^2$  na Figura 12, percebe-se que todos os projetos, exceto o do LB3, apresentaram excelente linearidade dos pontos. Os testes feitos com o mordente do LB3 não foram consistentes, uma vez que os dentes da régua móvel foram danificados em função da inversão da sua posição, razão pela qual esse projeto não foi submetido à tração de bobinamento.

Ainda na Figura 12, comparando-se os projetos do LB1 e LB4, percebe-se uma vantagem para o projeto de mordente do LB4. Acredita-se que essa diferença seja devida à descamação da tira, causando o emperramento logo no início do deslizamento.

Após avaliação da aplicação da metodologia nos dois casos, conforme mostrado na Figura 13 percebe-se que os dois projetos apresentaram excelente aproximação exponencial. Considerando-se que os resultados da tração de bobinamento obtidos no modelo físico são corretos, pode-se estimar um erro entre os valores medidos e calculados. Para o projeto do LB1, o erro médio foi de 11 % e no LB4 foi de 54 %.

A Figura 13 mostra ainda que os resultados da tração de bobinamento medidos no projeto do LB1 apresentaram valores bem superiores aos medidos no projeto do LB4. Situação inversa à que ocorreu nas medições de tração direta. Com base nos resultados, pode-se afirmar que o dobramento da tira sobre a superfície cilíndrica da régua guia do mordente do LB1 é o fator preponderante na elevação da tração de bobinamento. Adicionalmente, parte da força do mordente do LB4 é destinada a suportar o dobramento da tira sobre a régua móvel, o que reduz a capacidade do mordente frente à tração de bobinamento. Esse fato pode ser explicado observando-se a Figura 14, referente ao projeto do mordente do LB4.



**Figura 14.** Dobramento da tira sobre a régua móvel do mordente do LB4.

Nota-se, na Figura 14, que o primeiro dobramento da tira provoca um efeito negativo na força do mordente, uma vez que a tira é forçada contra a régua móvel, gerando um binário de força. Portanto, boa parte da força do mordente é destinada a suportar o dobramento da tira sobre a superfície cilíndrica e lisa da régua móvel, fazendo com que a capacidade do mordente para tração plana seja inferior à tração direta do mordente.

### 4.1 Implantação no LB3

Tendo-se em vista que nos testes experimentais, o projeto de mordente do LB4 foi o que apresentou melhores resultados de força de tração direta, pelo fato da similaridade entre os projetos do LB4 e LB3 e pela atratividade de mudança no processo de bobinamento do LB3, decidiu-se fazer uma alteração no mordente do

LB3, a fim de submetê-lo a  $\frac{3}{4}$  de volta de tira no mandril. A alteração se consistiu na inversão dos dentes da régua móvel conforme mostra a Figura 15.

Essa mudança se baseou nos resultados de tração direta obtidos no projeto do LB4, conforme apresentado na Figura 12 e na geometria das régua móvel e fixa do mordente do LB3. A forma semicilíndrica das régua inibe a ação da força de dobramento da tira sobre a régua móvel, o que evita redução da tração de bobinamento.

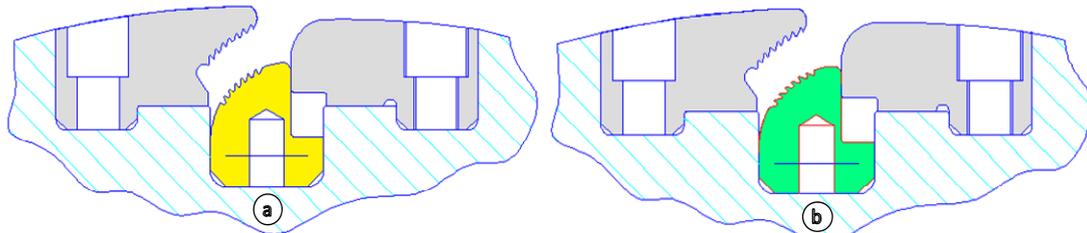


Figura 15. a) Mordente original do LB3, b) Mordente modificado do LB3

A implantação ocorreu em Junho/2011, quando os mandris foram testados com  $\frac{3}{4}$  de volta para todos os aços, em bobinas de várias larguras e espessuras, com tração máxima do equipamento de 60 t. Após 30 dias de operação foi liberado o processo do aço AISI 430, que utiliza tração máxima de 48 t., com apenas  $\frac{1}{2}$  volta de tira enrolada no mandril. Essa mudança foi feita com segurança, com base no modelo analítico para tração de bobinamento.

Os resultados obtidos até o momento indicam uma redução da geração de sucata por ponta grossa, da ordem de 90 t/mês. A Figura 16 apresenta o peso sucutado em função da perda variável (número de voltas no mandril).

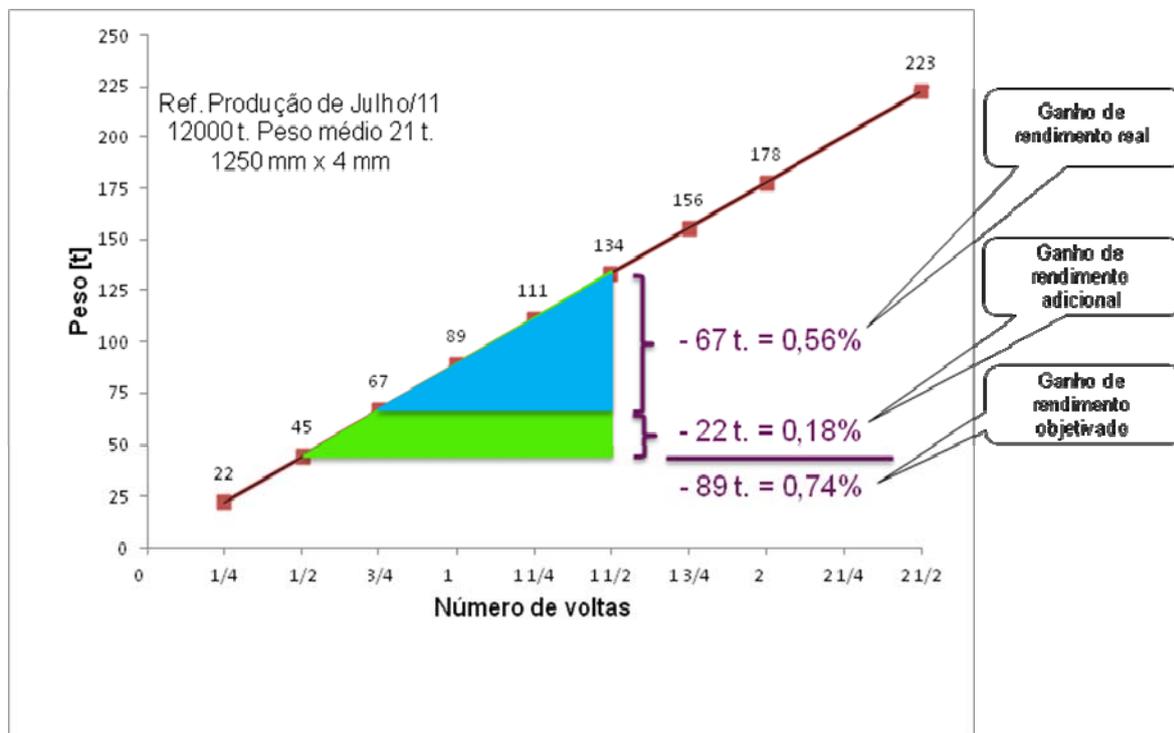


Figura 16. Sucatamento em função da perda variável no LB3.



## 5 CONCLUSÃO

Foi desenvolvida uma metodologia para avaliação da capacidade dos mordentes de mandris das bobinadeiras de laminadores a frio tipo Sendzimir, com o principal objetivo de definir qual é o valor da máxima tração que pode ser aplicada na tira, considerando-se menos de uma volta enrolada no mandril. Os ajustes da metodologia para sua aplicação como ferramenta de análise de processo foram executados em três casos experimentais estudados.

Os projetos dos dispositivos de testes foram considerados adequados para a pesquisa proposta, pois foram construídos muito próximos da escala real, de forma a manter inalteradas as condições físicas do processo. Além das funções de medição de tração direta e com arco de contato, eles também podem ser usados para se caracterizar o comportamento do atrito em função das condições de lubrificação e do arco de contato da tira com o mandril.

A alteração do projeto do mordente do LB3 permitiu a aplicação de  $\frac{1}{2}$  volta nos aços 430 e  $\frac{3}{4}$  de volta para os demais aços, com segurança, o que possibilita uma redução no sucata de 1070 t/ano.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Aperam South America, em nome dos gerentes, Fernando Claudio de Oliveira e Vicente Dambroz, pela cessão das imagens e base de dados e pela fabricação dos equipamentos.

### REFERÊNCIAS

- 1 Hitachi. Instruction Manual for ZR 21 BB-44 Sendzimir cold Mill. 1975.
- 2 Mannesmann Demag. Instruction Manual for ZR 21 BB-63 Sendzimir reversing cold strip mill. 1980.
- 3 T. Sendzimir, Inc. **Reverse pyramid winder mandrels**. Disponível em: <http://sendzimir.com>. Acessado em 15 de Set. 2010.
- 4 Roberts, W.L. **Cold Rolling of Steel**. 1 ed. New York: Marcel Dekker, 1978. 799p.
- 5 Marciniak, Z.; Duncan, J.L.; Hu, S.J. **Mechanics of sheet metal forming**, 2 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 211p