



# DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS PARA AVALIAÇÃO DE FORÇA DE TRAÇÃO EM MORDENTES DE MANDRIL DE LAMINADOR A FRIO<sup>1</sup>

Antônio Carlos Ataíde<sup>2</sup>  
Ronaldo de Araujo Rodrigues<sup>3</sup>  
Walmir Paranhos Viana<sup>4</sup>  
Antônio Eustáquio de Melo Pertence<sup>5</sup>  
Paulo Roberto Cetlin<sup>6</sup>

## Resumo

Os laminadores a frio da ArcelorMittal Inox Brasil são equipados com mandris que têm a função de sustentar o peso da bobina e transmitir torque proveniente do acionamento. Os mandris são dotados de mecanismos chamados mordente, cuja função é a de prender a ponta da tira no início do processo de enrolamento e assim permitir a aplicação da tração de bobinamento. A prática atual de bobinamento considera que a aplicação da tração somente pode ser iniciada após pelo menos 1,5 voltas de tira no mandril, o que gera perda de rendimento físico nos laminadores. Foram projetados dispositivos para avaliação da capacidade de força dos diversos mordentes existentes, levando em conta o arco de contato da tira com o mandril, com o objetivo de enrolar menos de uma volta de tira no mesmo. Os projetos dos dispositivos foram considerados adequados para a pesquisa proposta, pois foram construídos muito próximos da escala real, de forma a manter as condições físicas do processo inalteradas.

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

## DEVELOPMENT OF DEVICES FOR EVALUATION OF GRIPPERS'S FORCE OF MANDRELS FROM COLD ROLLING MILLS

### Abstract

The cold-rolling mills from ArcelorMittal Inox Brazil are equipped with mandrels which have the function of sustaining the coil load and torque transmission from the motor. The mandrels are provided of mechanisms called grippers, whose function is to grip the tail of the strip in the beginning of wrapping process and thus to allow winding tension application. The current winding practice considers that tension application can only be started after at least 1.5 turn of strip around the mandrel, which generates loss of physical yield of the mills. Devices were designed for evaluation of force capacity of several existing grippers, taking into account strip's arc contact around the mandrel, in order to wrap less than one turn around the mandrel. The devices' designs were considered suitable for the proposed research, because they were constructed very close to real scale, in order to keep physical process conditions unaltered.

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

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Assistente, Téc. Eng. Manutenção de Inox – ArcelorMittal Inox Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Eletricista, Assistente, Téc. Eng. Manutenção de Inox – ArcelorMittal Inox Brasil.

<sup>4</sup> Técnico Eletricista, Analista Técnico de Laminador Sendzimir – ArcelorMittal Inox Brasil.

<sup>5</sup> Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica – UFMG

<sup>6</sup> Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG

## 1 INTRODUÇÃO

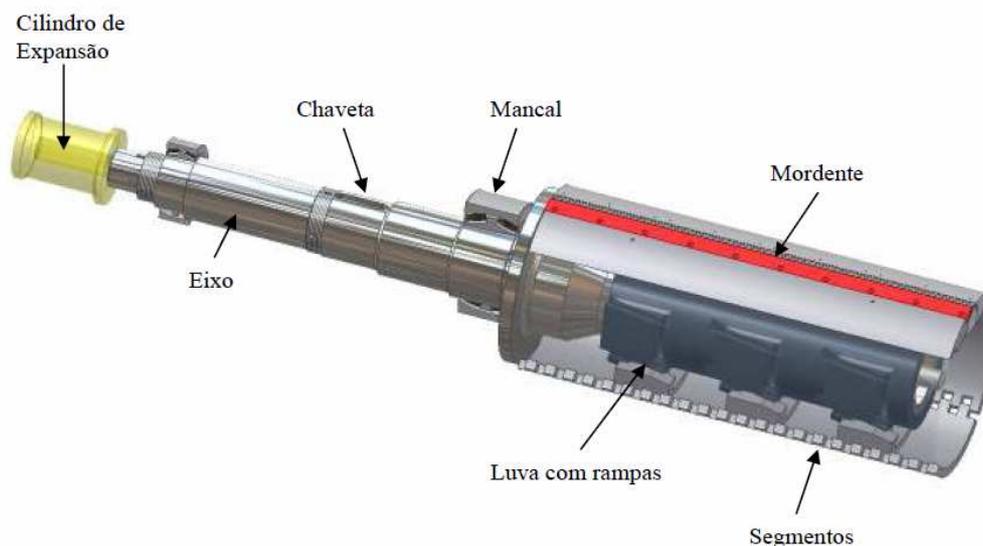
Os laminadores a frio modelo Sendzimir da ArcelorMittal Inox Brasil são equipados com bobinadeiras que têm a função de enrolar a bobina sobre um mandril expansível, na tração adequada ao processo. Os mandris são dotados de um mecanismo chamado mordente, que é montado em um dos quatro segmentos, cuja função é prender a ponta da tira a fim de iniciar o enrolamento e permitir a aplicação da tração.

A prática atual de bobinamento considera que a aplicação da tração somente pode ser iniciada após a tira ter completado pelo menos 1,5 volta no mandril. Desta forma, a tração pode ser aplicada porque o torque resistente, que é função da tensão circunferencial, do coeficiente de atrito entre a tira e o mandril e do atrito na interface tira/tira, é maior que o torque promovido pela tração na chapa. Assim, a força do mordente não tem ação frente à aplicação da tração na tira.<sup>(1)</sup>

Com este trabalho, objetivou-se desenvolver dispositivos capazes de avaliar a capacidade de força dos diferentes modelos de mordentes utilizados nos mandris dos laminadores, a fim de reduzir o comprimento de ponta grossa, através do enrolamento de menos de uma volta de tira no mandril.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

No processo de entendimento, foram avaliados os projetos de mandris de três laminadores a frio da ArcelorMittal Inox Brasil, LB1, LB3 e LB4. Observou-se uma similaridade entre os projetos com relação ao acionamento das réguas dos mordentes, que é feito através de pequenos pistões hidráulicos e com o retorno feito por molas, mas foram observadas também diferentes geometrias das réguas dos mordentes. Um conjunto típico de mandril é apresentado na Figura 1 e o detalhe de um projeto de mordente é apresentado na Figura 2.



**Figura 1.** Conjunto do mandril.

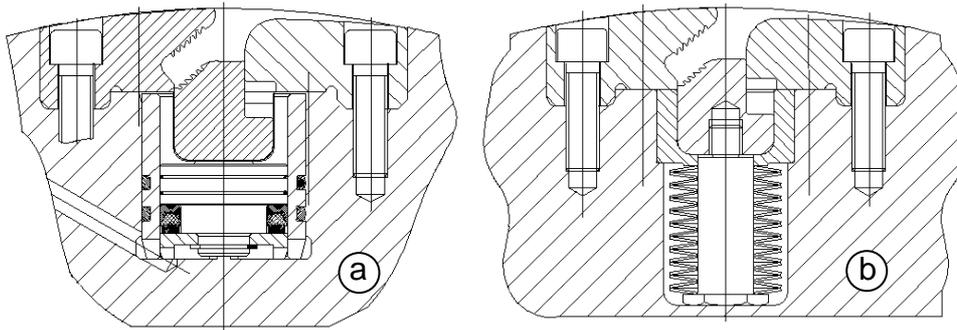


Figura 2. a) Detalhe do acionamento hidráulico; b) Detalhe do retorno da régua

Avaliaram-se as tensões específicas máximas, geradas com a aplicação de tração na tira em cada laminador, e definida a utilização de amostras metálicas de aço inoxidável AISI 304 com acabamento I1 (bobina laminada a quente, recozida e decapada mecanicamente e quimicamente), com espessura de 3 mm e largura de 100 mm.

Os dispositivos de testes de tração foram projetados de forma a obter uma cópia física dos mandris dos laminadores próximos da escala real, onde se utilizam os próprios segmentos que contêm os mordentes para realização dos ensaios. Eles foram desenvolvidos com base no simulador proposto por Wilson et al<sup>(2)</sup>, utilizado para avaliar o coeficiente de atrito durante a estampagem de chapas metálicas. Um dos dispositivos é utilizado para medição da capacidade de força de tração direta aplicada na amostra, com esta presa ao mordente. O outro também é utilizado para medição de tração, mas considerando ângulos de abraçamento da amostra no mandril de 270°, 315° e 345°, de forma que os valores de tração medidos nos dois dispositivos possam ser relacionados e assim é possível calcular o coeficiente de atrito na interface mandril e tira.

## 2.1 Modelo de Wilson

Visando simplificar a apresentação da execução dos testes, apresenta-se abaixo um breve resumo do modelo desenvolvido por Wilson et al.<sup>(2)</sup> que se refere a um simulador de conformação de tira metálica. A Figura 3 apresenta um esboço do simulador.

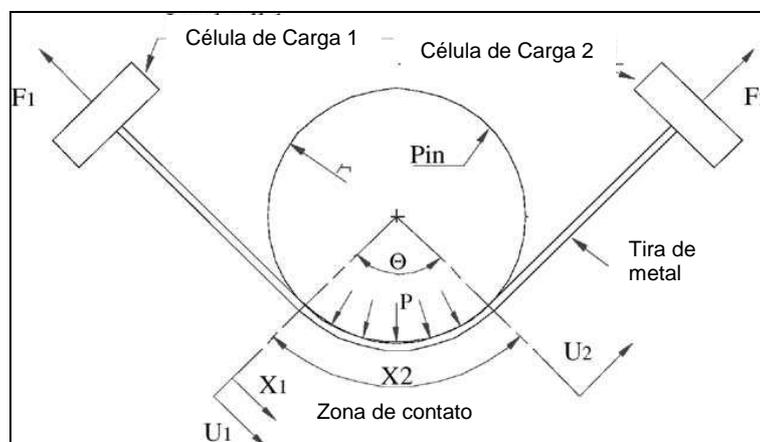


Figura 3. Esboço do simulador.

Neste simulador, são utilizados dois atuadores para aplicação das forças nas duas extremidades da tira de metal, a qual está parcialmente enrolada em um pino. Duas células de carga monitoram a carga transmitida antes e depois do pino.

Iniciando pelas condições de equilíbrio da tira, a pressão de contato média na interface tira e pino ( $p$ ), a tensão tangencial devido ao atrito ( $\tau$ ) e o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) podem ser avaliados.

Na direção  $x$  tem-se Eq. (1):

$$F_1 \sin \frac{\phi}{2} + F_2 \sin \frac{\phi}{2} = pR\phi w \quad (1)$$

Onde:

$F_1$  e  $F_2$  = Forças de tração antes e depois do pino [N]

$\phi$  = Ângulo de abraçamento [rad.]

$p$  = Pressão de contato [Pa]

$R$  = Raio do pino [m]

$w$  = Largura da tira [m]

A pressão de contato média pode ser escrita como indica a Eq. (2):

$$p = \frac{F_1 + F_2}{2Rw} \sin \frac{\phi}{2} \quad (2)$$

A condição de equilíbrio da tira na direção  $y$  pode ser escrita como mostra a Eq. (3):

$$F_1 \cos \frac{\phi}{2} - F_2 \cos \frac{\phi}{2} = \tau R\phi w \quad (3)$$

Logo a tensão tangencial pode ser escrita como mostra a Eq. (4):

$$\tau = \frac{F_1 - F_2}{R\phi w} \cos \frac{\phi}{2} \quad (4)$$

Finalmente, fazendo a relação das Eq. (4) e (2) o coeficiente de atrito  $\mu$  é obtido como indica a Eq. (5):

$$\mu = \frac{\tau}{p} = \frac{2(F_1 - F_2)}{\phi(F_1 + F_2)} \operatorname{ctg} \frac{\phi}{2} \quad (5)$$

A Eq. (5) será utilizada para quantificar o coeficiente de atrito estático, conhecidas  $F_1$  e  $F_2$  que serão medidas respectivamente nos dispositivos com ângulo de abraçamento e de tração direta.

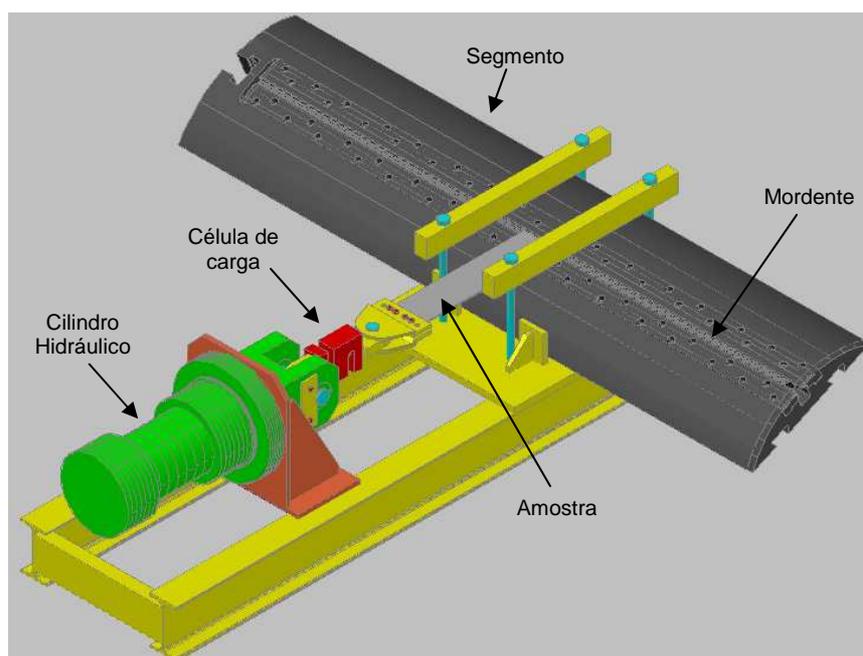
### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Equipamentos de Testes

Para execução dos testes foram desenvolvidos dois dispositivos. Estes dispositivos foram projetados de forma a obter uma cópia física dos mandris dos laminadores a frio da ArcelorMittal Inox Brasil, próximos da escala real e são compostos pelos seguintes componentes:

- componentes estruturais para sustentar o segmento que contém o mordente e o cilindro hidráulico;
- garra para conectar a amostra à célula de carga;
- célula de carga modelo Z-5T de capacidade de 50 kN para medir as forças de tração;<sup>(3)</sup>
- cilindro hidráulico Ø 140 mm x 85 mm x 85 mm de curso para tracionar a amostra;
- indicador de pesagem modelo 3107 C para aquisição de dados medidos pela célula de carga;<sup>(3)</sup>
- duas unidades hidráulicas para alimentação do mordente e do cilindro hidráulico de tração, equipadas com sensores de pressão; e
- sistema de aquisição, capaz de registrar e analisar os dados coletados.

O dispositivo mostrado na Figura 4 é utilizado para medição da força de tração que o mordente é capaz de segurar, para isto, o segmento do mandril é posicionado de forma que a amostra, após ser presa no mordente, fique alinhada com o cilindro hidráulico. A outra extremidade da amostra é presa a uma garra que por sua vez está conectada à célula de carga, responsável pela medição de força, e para aplicação da força, é utilizado um cilindro hidráulico que também está ligado à célula de carga.



**Figura 4.** Dispositivo para medição de tração direta.

O outro sistema mostrado na Figura 5 é também utilizado para medição de força de tração do mordente, mas considerando um abraçamento da amostra na luva de aço, que representa o mandril do laminador em escala real (Ø 610 mm). Nesta luva de aço estrutural será presa a placa que contém o mordente, de forma que serão avaliadas três condições de testes, com arco de contato de 270°, 315° e 345°.

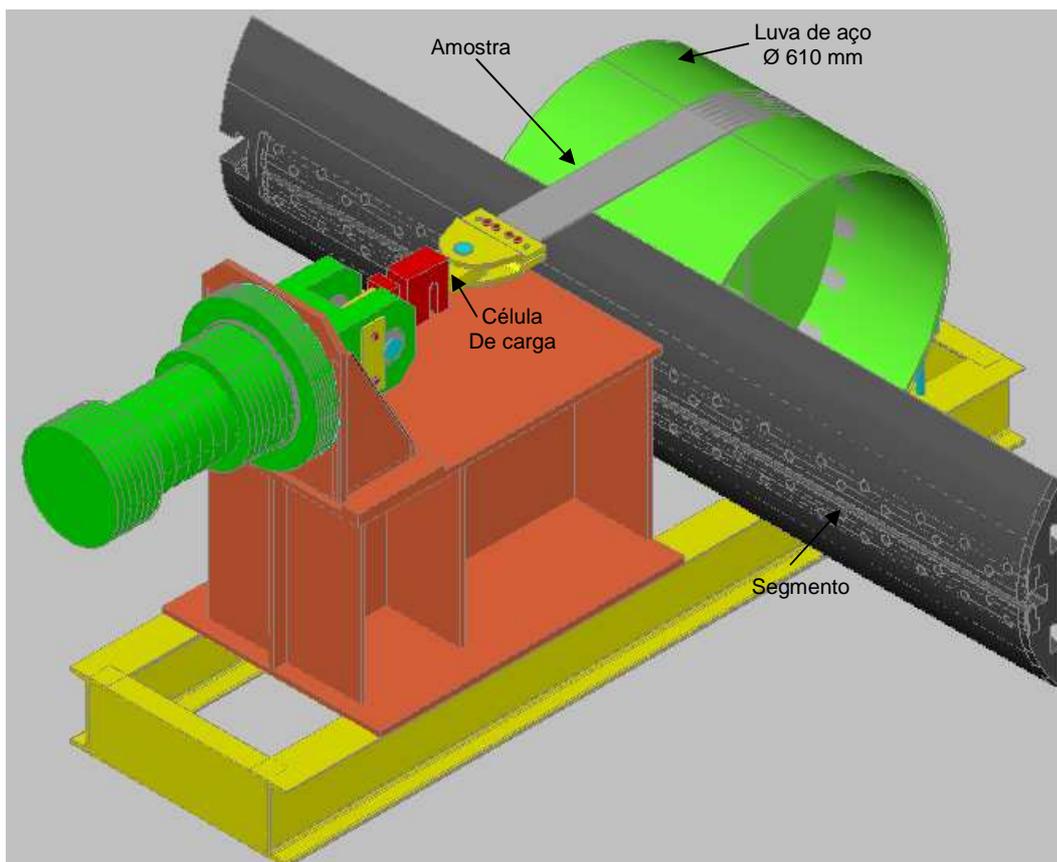


Figura 5. Dispositivo para medição de tração com ângulo de abraçamento

Para os dois sistemas utiliza-se uma unidade hidráulica para alimentação dos pistões do mordente e outra para alimentação do cilindro hidráulico responsável pela aplicação de força. Estas unidades são equipadas com sensores de pressão devidamente calibrados, de forma que os sinais possam ser registrados no sistema de aquisição de dados.

A célula de carga modelo Z-5T de capacidade de 50 kN foi escolhida tendo em vista a utilização de medição direta e por oferecer baixo erro combinado, <0,03 %. Ligado a este componente, há um indicador para fornecer os valores de carga medidos durante os testes, os quais também são registrados e analisados.

Os sistemas apresentados são utilizados para desenvolver um plano experimental levando em conta as seguintes variáveis: lubrificação, pressão de contato entre a tira (amostra) e a régua do mordente, material da tira, arco de contato da tira com a luva de aço, rugosidade da tira, pressão hidráulica de alimentação do mordente e força do mordente.

### 3.2 Planejamento dos Testes

Serão utilizadas tiras de aço inoxidável austenítico AISI 304 para realização dos testes. As amostras que serão utilizadas no equipamento de medição de tração direta que está apresentado na Figura 4, serão cortadas com comprimento de 320 mm e as amostras que serão utilizadas no equipamento mostrado na Figura 5, com ângulo de abraçamento, serão cortadas nos comprimentos de 1.840 mm, 2.080 mm e 2.240 mm e testadas respectivamente com ângulos de abraçamento de 270°, 315° e 345°. Para cada teste replicado será utilizada uma nova amostra.



Todas as amostras devem ser conferidas quanto à espessura, largura, dureza e rugosidade, bem como realizados ensaios de tração nos materiais das bobinas de onde foram retiradas as amostras, a fim de conhecer as propriedades mecânicas. As amostras devem ser cortadas na mesma direção do sentido de laminação da bobina. Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os principais parâmetros que serão investigados no dispositivo de tração direta e no dispositivo com ângulo de abraçamento.

**Tabela 1.** Variáveis investigadas no dispositivo de tração direta conforme Figura 4

Aço	Esp. [mm]	Larg. [mm]	Comp. [mm]	Rugosidade	Cond. mordente	Cond. lubrif.	Projetos
AISI 304	3	100	320	I1	Novo Usado	Seco Oleado	LB1 LB3 LB4

**Tabela 2.** Variáveis investigadas no dispositivo com ângulo de abraçamento conforme Figura 5

Aço	Esp. [mm]	Larg. [mm]	Rugosidade	Cond. mordente	Cond. lubrif.	Arco contato
AISI 304	3	100	I1	Novo Usado	Seco Oleado	270° 315° 345°

O acabamento I1 refere-se a chapas laminadas a quente, tratadas termicamente, decapadas mecanicamente e quimicamente.

Serão avaliados (testados) mordentes de três laminadores a frio da ArcelorMittal Inox Brasil, LB1, LB3 e LB4.

O aço AISI 304 foi escolhido tendo em vista sua elevada resistência mecânica e por ser o material cujo processo de laminação exige elevada força de tração. Os ensaios serão feitos com tiras de largura de 100 mm e com forças hidráulicas de alimentação dos mordentes iguais para os três projetos.

No dispositivo de medição de tração com ângulo de abraçamento serão avaliadas as forças de tração na amostra considerando três ângulos de abraçamento (270°, 315° e 345°). Os valores de tração medidos serão relacionados com as trações medidas no dispositivo de tração direta e através da Eq. 5 será possível estimar o coeficiente de atrito na interface amostra/luva de aço e estabelecer uma relação entre as forças de tração direta e com ângulo de abraçamento.

A pressão e vazão de óleo de alimentação do cilindro hidráulico que fará a tração nas amostras serão constantes para todos os testes. Não serão consideradas as forças necessárias para flexão da tira sobre a luva de aço para os testes com ângulo de abraçamento.

Durante os testes serão coletados simultaneamente os valores de pressão hidráulica de alimentação do mordente, de alimentação do cilindro de tração e a força medida pela célula de carga. Estas variáveis serão analisadas através do sistema de aquisição e análise de dados. Outros dados serão coletados manualmente, tais como: dureza, rugosidade, condição das réguas (novas e usadas), condições de lubrificação das réguas dos mordentes e da luva de aço e arco de contato da tira com a luva de aço

Para medição da pressão de contato será utilizado um filme sensor de indicação de pressão superficial que irá fornecer a distribuição e a magnitude da pressão de contato na interface amostra/mordente. Esse sensor captura a impressão da pressão de contato e indica o valor através da intensidade de cor na impressão, quanto maior a pressão maior é a intensidade da cor<sup>(4)</sup>. O resultado da medição é obtido por comparação da impressão no filme com o catálogo do fornecedor ou através de equipamento ótico que pode ser realizado no laboratório do fornecedor do filme sensor.

Conforme norma ASTM G-143,<sup>(5)</sup> cada ensaio deve ser repetido três vezes. A sequência dos ensaios será: primeiro realizar os testes com o dispositivo de medição de tração direta de forma que as tiras serão presas nos mordentes no centro da placa conforme mostrado na Figura 6. Na condição a seco as réguas serão limpas com solvente para remoção de oleosidade e resíduos e na condição lubrificado serão oleadas com óleo mineral utilizado no processo de refrigeração da tira durante o processo de laminação. Para os ensaios com o dispositivo de medição de tração com ângulo de abraçamento, a diferença será na condição da superfície da luva de aço que poderá ser seca ou também lubrificada com o óleo de laminação.

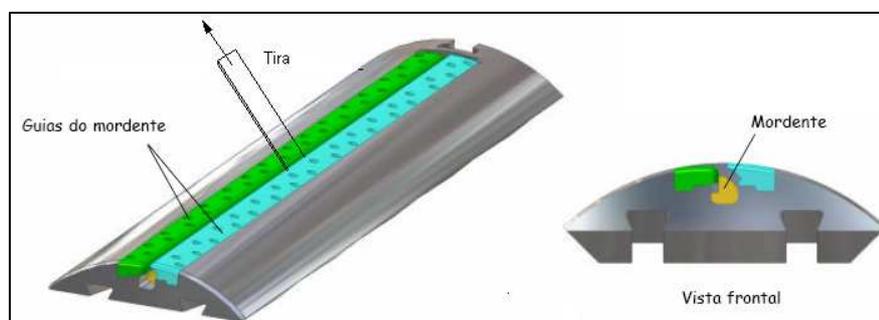


Figura 6. Desenho da placa do mandril do LB3.

#### 4 DISCUSSÃO

Os dois dispositivos desenvolvidos podem ser usados para caracterizar o comportamento do atrito em função das condições de lubrificação e do arco de contato da tira com o mandril.

Espera-se elevada confiabilidade dos testes, uma vez que os equipamentos utilizam os próprios segmentos dos mandris com os respectivos mordentes, e a luva de aço utilizada no equipamento para testes com ângulo de abraçamento foi fabricada em escala real, assim há uma grande aproximação das condições industriais.

A metodologia proposta pode ainda ser melhorada com a utilização de sensor de posição montado no cilindro hidráulico de tração a fim de avaliar a força no mordente durante toda a distância de deslizamento da amostra com as réguas.

O efeito da velocidade de deslocamento do cilindro hidráulico de tração deve ser considerado, tendo em vista uma aproximação da rampa de tração que é aplicada nos laminadores. O coeficiente de fricção é reduzido conforme a velocidade de deslizamento aumenta.<sup>(6)</sup>

#### 5 CONCLUSÃO

No presente trabalho foram apresentados equipamentos experimentais derivados do simulador proposto por Wilson et al.<sup>(2)</sup> Estes equipamentos permitem avaliar o atrito

entre as réguas do mordente e a tira, bem como o atrito na interface tira e mandril, de forma que todos os projetos de mandris dos laminadores a frio da ArcelorMittal Inox Brasil possam ser avaliados.

Os coeficientes de fricção podem ser calculados com base nas forças de tração medidas nos dois dispositivos e no arco de contato formado entre a tira e a luva de aço, que possui diâmetro idêntico ao dos mandris dos laminadores, através da clássica equação de polia/correia.

Ressalta-se que este trabalho está em fase inicial de ajustes e sua aplicação na avaliação dos mordentes irá confirmar os resultados esperados.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à ArcelorMittal Inox Brasil, 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 TURLEY, J.W. Sendzimir Controlled Collapse Winder. *Iron and Steel Engineer*, v.51, n 42, November 1974.
- 2 WILSON, R. D., MALKANI, H. G., SAHA, P. K. Boundary Friction Measurements Using a New Sheet Metal Forming Simulator. *NAMRI/SME*, XIX, 37 – 42, 1991.
- 3 ALFA INSTRUMENTOS, disponível em: [HTTP://alfainstrumentos.com.br](http://alfainstrumentos.com.br). Acessado em dezembro de 2009.
- 4 SENSORPROD, disponível em: [HTTP://sensorprod.com](http://sensorprod.com). Acessado em novembro de 2009.
- 5 ASTM G-143. Standard Test Method for Measurement of Web/Roller Friction characteristics. American Society for Testing and Materials, 1996.
- 6 HAO, S., KLAMECKI, B.E., RAMALINGAM, S. Friction measurements apparatus for sheet metal forming. *Wear*, v. 224, 1 – 7, 1999.