

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS PARA AVALIAÇÃO DE FORÇA DE TRAÇÃO EM MORDENTES DE MANDRIL DE LAMINADOR A FRIO

Antônio Carlos Ataíde, antonio-carlos.ataide@arcelormittal.com.br¹

Ronaldo de Araujo Rodrigues, ronaldo-araujo.rodrigues@arcelormittal.com.br¹

Paulo Roberto Cetlin, pzetlin@demet.ufmg.br²

Antônio Eustáquio de Melo Pertence, pertence@demec.ufmg.br²

¹ArcelorMittal Inox Brasil, Praça 1º de maio, 09, Centro, CEP 35180-018, Timóteo, Minas Gerais, Brasil.

²Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 – Campos Universitário, CEP 31270.901, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

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 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 volta 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

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 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, conforme afirma Turley (1974).

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. LAMINADOR A FRIO MODELO SENDZIMIR

Laminadores Sendzimir são conhecidos mundialmente pela capacidade de laminar bobinas de materiais extremamente duros e de espessuras muito finas. O pequeno diâmetro do rolo de trabalho permite elevadas reduções em materiais duros tais como aços inoxidáveis e siliciosos. Além disso, fornece excelente acabamento superficial. A Figura (1) apresenta o agrupamento dos cilindros montados na cadeira de laminação, os rolos indicados pelas letras A até H são chamados de rolamentos de encosto (Sendzimir, 2009).

Além da cadeira de laminação o laminador possui ainda mais quatro conjuntos principais os quais são: uma desbobinadeira, uma desempenadeira e duas bobinadeiras, uma de cada lado da cadeira de laminação. O primeiro passe de laminação é feito através da desbobinadeira para a bobinadeira direita conforme mostrado na Fig. (2). Os passes seguintes são realizados via bobinadeiras e de acordo com o número de passes a bobina pode ser retirada tanto da bobinadeira direita quanto da bobinadeira esquerda. Os conjuntos de interesse deste trabalho são as bobinadeiras as quais são compostas de sistemas de acionamento e de expansão dos mandris que suportam as bobinas.

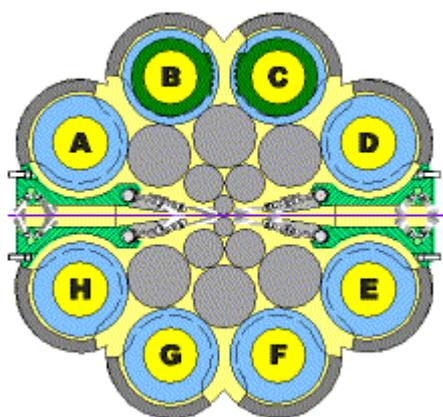


Figura 1. Arranjo dos cilindros de laminação

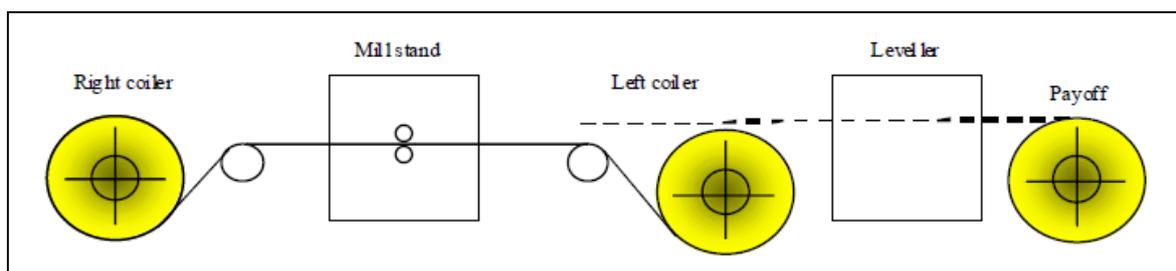


Figura 2. Configuração de laminador Sendzimir

Com este trabalho se pretende aumentar o rendimento dos laminadores com o enrolamento de menos de uma volta de tira nos mandris. O enrolamento de $\frac{3}{4}$ de volta representa 2,8 metros a mais de tira laminada. Para isto, o grande desafio é avaliar os projetos dos mordentes existentes a fim de torná-los capazes de resistir à aplicação da tração.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

No processo de entendimento, foram avaliados os projetos dos 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 o retorno feito por molas montadas na régua móvel, mas foram observadas também diferentes geometrias das réguas dos mordentes na região de contato das réguas com a tira. O acionamento hidráulico da régua é feito através da alimentação de óleo proveniente do cilindro hidráulico de expansão do mandril, que é conduzido pelo eixo até chegar ao segmento onde estão montados os pistões. Um conjunto típico de mandril é apresentado na Fig. (3) e o detalhe de um projeto de mordente é apresentado na Fig. (4).

Avaliaram-se as tensões específicas máximas geradas com a aplicação de tração na tira em cada laminador e definiu-se pela utilização de amostras metálicas de aço inoxidável AISI 304 com acabamento II (bobina laminada a quente, recozida, 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 (1991), utilizado para avaliar o atrito durante a estampagem de chapas metálicas.

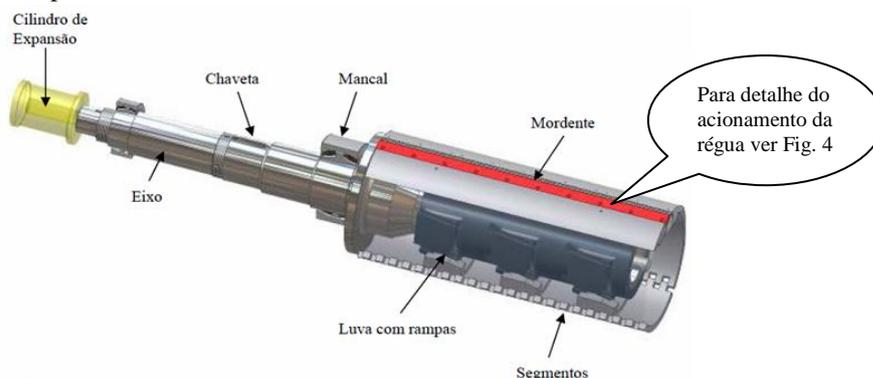


Figura 3. Conjunto típico do mandril.

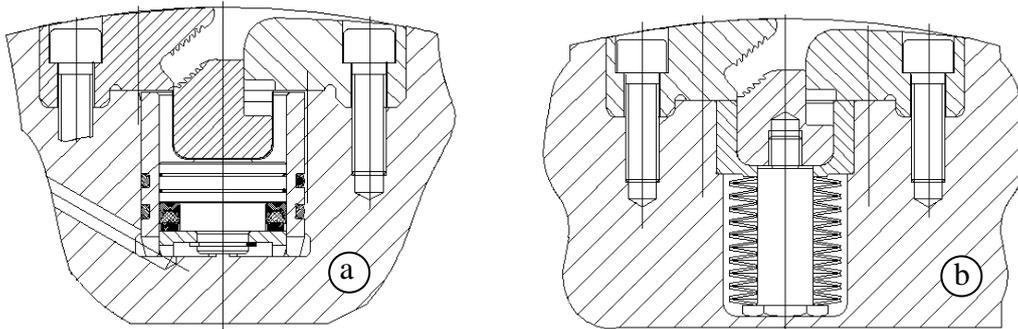


Figura 4. a - detalhe do acionamento hidráulico, b - detalhe do retorno da régua por mola

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 forma que os valores de tração medidos nos dois dispositivos possam ser relacionados e assim é possível calcular o atrito médio na interface mandril e tira.

3.1. Simulador de conformação de tira metálica (SMFS ou Capstan Test)

Esse modelo foi desenvolvido por Wilson et al (1991) que se refere a um simulador de conformação de tira metálica. 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. A Figura (5) apresenta um esboço do simulador.

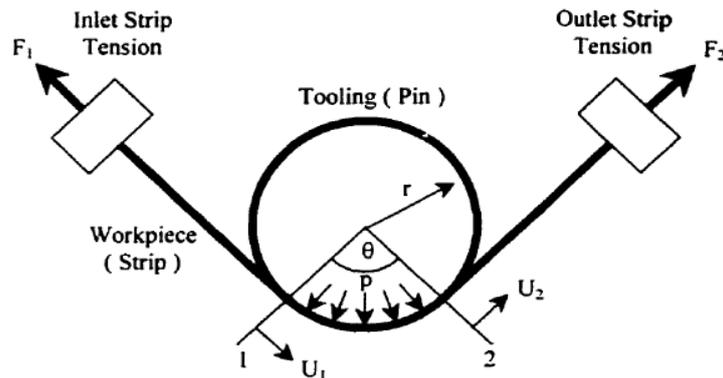


Figura 5. Esboço do simulador

Com este modelo é possível estimar os valores da pressão de contato média (p) e do atrito médio (μ) na interface tira e pino. As equações para determinação destas variáveis são apresentadas abaixo. O diagrama é apresentado na Fig. (6).

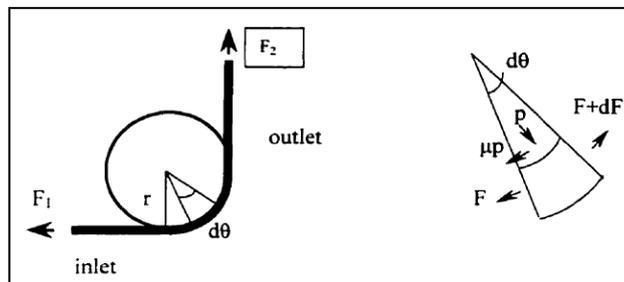


Figura 6. Diagrama para análise do sistema

Na direção radial tem-se pela Eq. (1):

$$pwr d\theta = F \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) + (F + dF) \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \quad (1)$$

onde F é a força aplicada, θ é o ângulo de abraçamento, p a pressão de contato média, r o raio do pino e w a largura da tira. Negligenciando os diferenciais de segunda ordem e tendo como base o seno de um pequeno ângulo sendo igual a de um ângulo muito pequeno, da Eq. (1) a pressão de contato pode ser escrita como mostra a Eq. (2).

$$p = \frac{F}{Rw} \quad (2)$$

Fazendo F igual à média das forças de entrada e saída, a pressão de contato média pode ser escrita como:

$$p = \frac{F2 + F1}{2Rw} \quad (3)$$

Para o equilíbrio na direção tangencial é apresentada a Eq. (4):

$$(F + dF) \cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) = F \cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) + \mu prw d\theta \quad (4)$$

Considerando θ um ângulo pequeno,

$$dF = \mu prw d\theta \quad (5)$$

Substituindo p :

$$dF = \mu \frac{F2 + F1}{2} d\theta \quad (6)$$

Integrando:

$$F2 - F1 = \mu \frac{F2 + F1}{2} \theta \quad (7)$$

Finalmente o coeficiente de atrito μ é obtido.

$$\mu = \frac{2(F2 - F1)}{\theta(F2 + F1)} \quad (8)$$

Mas a diferença entre $F2$ e $F1$ é devida ao atrito e a força necessária para curvar a tira sobre o pino, a qual está apresentada na Eq. (9). (Swift, 1948).

$$FB = \frac{\sigma_y t^2 w}{2r} \quad (9)$$

onde FB é a força de flexão, σ_y é o limite de escoamento, t a espessura da tira, w a largura e r o raio de curvatura. Logo, a Eq. (8) pode ser modificada e uma nova fórmula para o atrito é apresentada na Eq. (10).

$$\mu = \frac{2(F2 - F1 - FB)}{\theta(F2 + F1)} \quad (10)$$

Esta equação foi utilizada para quantificar o atrito estático, conhecidas $F1$ e $F2$ que foram medidas respectivamente nos dispositivos de tração direta e com ângulo de abraçamento.

4. 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 (Alfa, 2009);
- cilindro hidráulico \varnothing 0,140 m x 0,085 m x 0,085 m de curso para tracionar a amostra;
- indicador de pesagem modelo 3107 C para aquisição de dados medidos pela célula de carga (Alfa, 2009);
- duas unidades hidráulicas para alimentação do mordente e do cilindro hidráulico de tração, equipadas com sensores de pressão;
- Sensor de posição do cilindro de tração;
- sistema de aquisição, capaz de registrar e analisar os dados coletados.

O dispositivo mostrado na Fig. (7) é utilizado para medição da capacidade do mordente diante do esforço de tração na tira. 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.

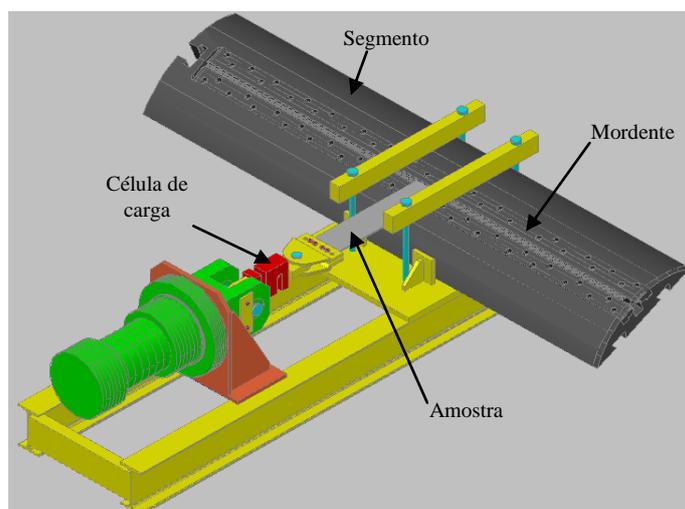


Figura 7. Dispositivo para medição de tração direta

O outro dispositivo mostrado na Fig. (8) é também utilizado para medição da capacidade do mordente, mas considerando um abraçamento da amostra na luva de aço que representa o mandril do laminador em escala real (\varnothing 0,610 m). Nesta luva de aço estrutural é preso o segmento que contém o mordente completando a circunferência. Com este dispositivo é possível avaliar a influência do arco de contato na capacidade do mordente que para este estudo foi de 270° .

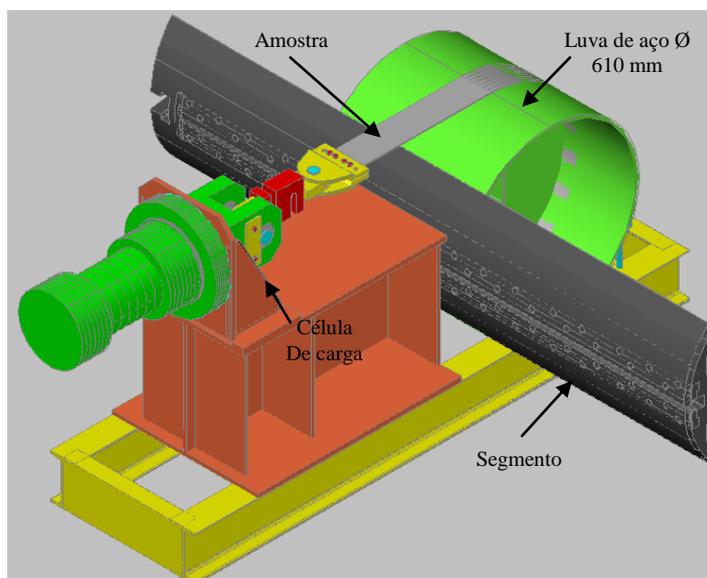


Figura 8. Dispositivo para medição de tração com ângulo de abraçamento

Para os dois dispositivos utilizou-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 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 foram registrados e analisados.

Os sistemas apresentados foram 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.

5. RESULTADOS

Foram utilizadas tiras de aço inoxidável austenítico AISI 304 para realização dos testes. As amostras utilizadas no dispositivo de medição de tração direta que está apresentado na Fig. (7) foram cortadas com comprimento de 320 mm e as amostras utilizadas no equipamento mostrado na Fig. (8), com ângulo de abraçamento foram cortadas com 1840 mm de comprimento. Para cada teste replicado foi utilizada uma nova amostra.

Todas as amostras foram conferidas quanto à espessura, largura, dureza e rugosidade, bem como realizado ensaio de tração no material da bobina de onde foram retiradas as amostras a fim de conhecer as propriedades mecânicas do mesmo. As amostras foram cortadas na mesma direção do sentido de laminação da bobina.

Na Tabela 1 são apresentadas as especificações das amostras, bem como as variáveis investigadas.

Tabela 1. Especificação das amostras/variáveis investigadas.

Aço	Esp. [mm]	Larg. [mm]	Comp. [mm]	Rugosidade	Cond. mordente	Cond. lubrif.	Arco de Contato
AISI 304	3	100	320 1840	I1	Novo	Seco Oleado	270°

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

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.

No dispositivo de medição de tração com ângulo de abraçamento foram avaliadas as forças de tração medidas com ângulo de abraçamento de 270°, $\frac{3}{4}$ de volta.

A pressão e vazão de óleo de alimentação do cilindro hidráulico de tração permaneceram constantes para todos os testes.

Não foi considerada a força necessária para flexão da tira sobre a luva de aço para os testes com ângulo de abraçamento, mas considerou-se a força para curvatura da tira na saída do mordente, cujo valor é superior uma vez que a relação entre o raio e a espessura é bem menor. Abaixo, na Fig. (9) é apresentada uma amostra após o ensaio e no detalhe o raio de curvatura na saída do mordente.



Figura 9. Tira ensaiada com ângulo de abraçamento

Durante os testes foram 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 foram analisadas através do sistema de aquisição e análise de dados. Outros dados foram coletados manualmente tais como: dureza, rugosidade, condições de desgaste das régua, condições de lubrificação das régua e da luva de aço e o arco de contato da tira com

a luva de aço

A sequência dos ensaios foi primeiro realizar os testes com o dispositivo de medição de tração direta com as tiras presas nos mordentes no centro da placa conforme mostrado na Fig. (10).

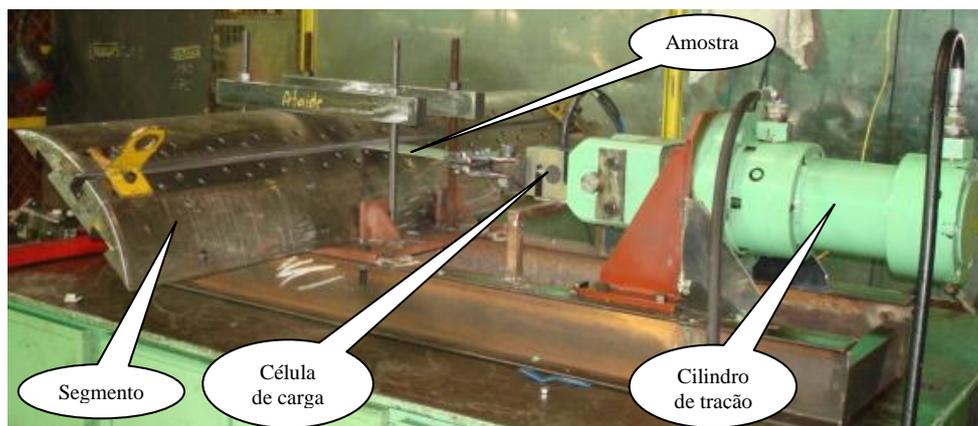


Figura 10. Dispositivo de tração direta.

Na condição a seco as réguas foram submetidas a um processo de limpeza com solvente para remoção de oleosidade e resíduos. Para os ensaios com o dispositivo de medição de tração com ângulo de abraçamento na condição a seco, tanto a luva de aço quanto o segmento também foram limpos com solvente e na condição lubrificado foram oleados com óleo mineral utilizado para refrigeração da tira durante o processo de laminação. A Figura (11) apresenta a montagem do dispositivo utilizado para verificar a influência do ângulo de abraçamento.

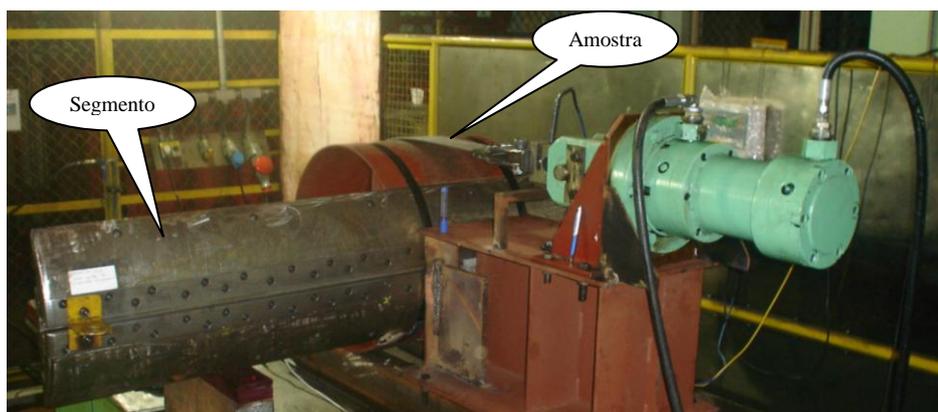


Figura 11. Dispositivo com ângulo de abraçamento.

Foram realizados três ensaios no dispositivo de tração direta e seis ensaios no dispositivo com ângulo de abraçamento conforme recomendação da norma ASTM G-143 (1996).

A média dos valores máximos medidos no dispositivo de tração direta foi de 38,6 kN. A Figura (12) apresenta o resultado de um ensaio onde se verifica inicialmente um incremento da força com deslizamento discreto da tira no mordente e a partir do ponto indicado na figura ocorre a redução da força e o deslizamento contínuo da tira.

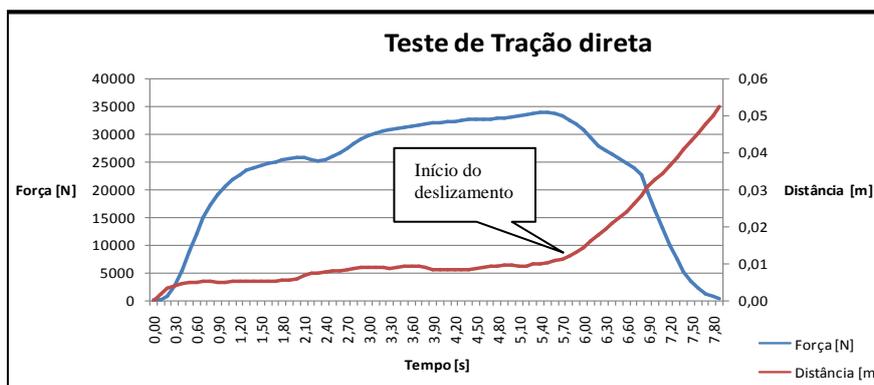


Figura 12. Valores de força e deslocamento medidos no dispositivo de tração direta.

A força de flexão calculada para a região da saída do mordente foi de 2,948 kN, considerando o limite de escoamento do material de 363 MPa e raio da tira conformada de 0,050 m. A média dos valores máximos medidos no dispositivo com ângulo de abraçamento foi de 113,335 kN. Na Figura (13) é apresentado o resultado de um ensaio realizado no dispositivo com ângulo de abraçamento na condição lubrificado.

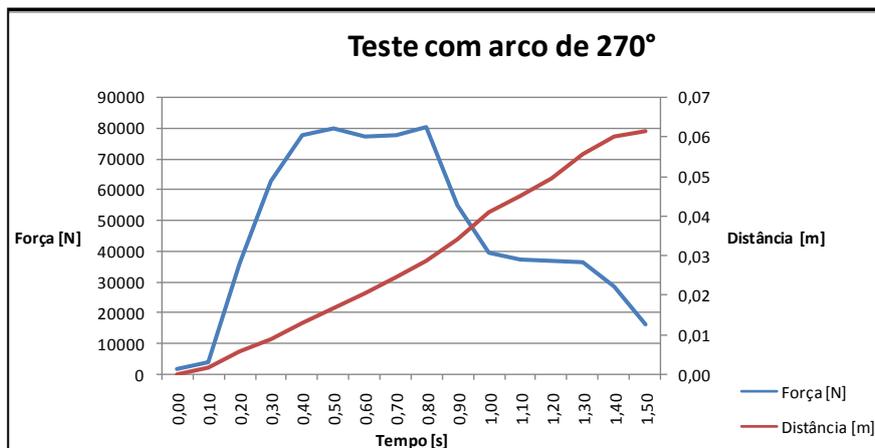


Figura 13. Valores de força e deslocamento medidos no dispositivo de tração direta.

Os valores de tração medidos nos dois dispositivos foram relacionados e através da Eq. (10) foi estimado o atrito médio na interface amostra/luva de aço, os quais são:

$$\mu = 0,20 \text{ na condição a seco e,}$$

$$\mu = 0,14 \text{ na condição lubrificado.}$$

6. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram apresentados os equipamentos desenvolvidos para avaliar o atrito entre as régua de 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. Neste trabalho avaliou-se apenas o projeto de mordente do laminador de bobinas nº 3, LB3.

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.

O atrito da tira com o mandril pode ser calculado com base nas forças de tração medidas nos dois dispositivos e no arco de contato entre a tira e a luva de aço, que possui diâmetro idêntico ao dos mandris dos laminadores.

A aplicação de força no cilindro hidráulico de tração deve ser controlada, tendo em vista uma aproximação da rampa de tração dos laminadores, para isto o circuito hidráulico deve contemplar válvula redutora de pressão proporcional e assim será possível variar a rampa de tração e verificar a influência desta variável na capacidade de força dos mordentes. O atrito é reduzido conforme a velocidade de deslizamento aumenta (Hao et al, 1999). Neste trabalho não foi utilizada rampa de força.

Para medição da pressão de contato entre a tira e a régua do mordente, bem como entre a tira e a luva de aço, pode ser utilizado um filme sensor de indicação de pressão superficial que irá fornecer a distribuição e a magnitude da pressão de contato. 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. 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 (Sensorprod, 2009).

É necessário prosseguir com os estudos a fim de verificar o comportamento dos outros projetos de mordente dos demais laminadores da ArcelorMittal Inox Brasil.

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.

7. AGRADECIMENTOS

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

8. REFERÊNCIAS

- Alfa Instrumentos, disponível em: <http://alfainstrumentos.com.br>, acessado em dezembro de 2009.
- ASTM G-143, 1996 “Standart Test Method for Measurement of Web/Roller Friction characteristics”, American Society for Testing and Materials.
- Hao, S., Klamecki, B.E., Ramalingam, S., 1999, “Friction measurements apparatus for sheet metal forming”, *Wear*, v. 224, 1 – 7.
- Sensorprod, disponível em: <http://sensorprod.com>, acessado em novembro de 2009.
- Swift,H.W.,1948, “Plastic Bending Under Tension”, *Engineering*, vol. 166, pp. 333-359.
- T. Sendzimir, Inc., disponível em: <http://sendzimir.com>, acessado em dezembro de 2009.
- Turley, J.W., 1974, “Sendzimir Controlled Collapse Winder”, *Iron and Steel Engineer*, v.51, n 42.
- Wilson, R. D., Malkani, H. G., Saha, P. K., 1991, “Boundary Friction Measurements Using a New Sheet Metal Forming Simulator”, *NAMRI/SME*, XIX, 37 – 42.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

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

Antônio Carlos Ataíde, antonio-carlos.ataide@arcelormittal.com.br¹

Ronaldo de Araujo Rodrigues, ronaldo-araujo.rodrigues@arcelormittal.com.br¹

Paulo Roberto Cetlin, pccetlin@demet.ufmg.br²

Antônio Eustáquio de Melo Pertence, pertence@demec.ufmg.br²

¹ArcelorMittal Inox Brazil, Praça 1º de maio, 09, Centro, CEP 35180-018, Timóteo, Minas Gerais, Brazil.

²Universidade Federal University de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 – Campos Universitário, CEP 31270.901, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

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.*