



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

**ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UMA  
METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DOS  
MORDENTES DE MANDRIS DE BOBINADEIRAS DE  
LAMINADORES A FRIO TIPO SENDZIMIR**

**ANTÔNIO CARLOS ATAÍDE**

Belo Horizonte, 22 de fevereiro de 2011.

Antônio Carlos Ataíde

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UMA  
METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DOS  
MORDENTES DE MANDRIS DE BOBINADEIRAS DE  
LAMINADORES A FRIO TIPO SENDZIMIR**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais,  
como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica.**

**Área de concentração: Projeto Mecânico.**

**Orientador: Prof. Antônio Eustáquio de Melo Pertence.**

**UFMG**

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
Ano 2011



**Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**  
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha 31.270-901 – Belo Horizonte – MG  
Tel.: +55 31 3499-5145 – Fax.: + 55 31 3443-3783  
[www.demec.ufmg.br](http://www.demec.ufmg.br) – E-mail: [cpgmec@demec.ufmg.br](mailto:cpgmec@demec.ufmg.br)

## **DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DOS MORDENTES DE MANDRIS DE BOBINADEIRAS DE LAMINADORES A FRIO TIPO SENDZIMIR**

**ANTÔNIO CARLOS ATAÍDE**

Dissertação defendida e aprovada em 22 de fevereiro de 2011, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “**Mestre em Engenharia Mecânica**”, na área de concentração de “**Projeto Mecânico**”.

---

Prof. Dr. Antônio Eustáquio de Melo Pertence – UFMG – Orientador

---

Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin – UFMG – Examinador

---

Prof. Dr. Haroldo Béria Campos – UFMG – Examinador

---

Prof. Dr. Danilo Amaral – UFMG – Examinador suplente

Aos meus filhos Arthur, Lara e Júlia;  
a minha esposa Bilu.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao prezado Professor Antônio Eustáquio de Melo Pertence por sua orientação e incentivo.

Ao amigo Sérgio Rolla Guimarães pelo incentivo e indicação do tema.

À ArcelorMittal Inox Brasil, na pessoa dos gerentes Paulo Marcelo de Andrade Novaes e Fernando Cláudio de Oliveira, pela cessão das imagens, recursos materiais e oportunidade ao meu crescimento profissional.

À equipe da oficina mecânica central da ArcelorMittal Inox Brasil, na pessoa do gerente Vicente Dambroz, pela fabricação das peças dos dispositivos de testes.

À equipe de metrologia da ArcelorMittal Inox Brasil, pelo fornecimento e calibração dos instrumentos.

Aos grandes amigos da manutenção dos laminadores de aço inoxidável da Arcelor Mittal Inox Brasil, pelo incentivo e apoio na condução dos experimentos.

Ao amigo Paulo Roberto Cruz Cardi, pelo incentivo ao meu crescimento profissional.

Ao amigo José Carlos Batista, pelo apoio e incentivo durante a pesquisa.

Agradecimento especial ao amigo José Torres de Castro, pelos ensinamentos ao longo de minha carreira profissional.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE TABELAS .....	10
LISTA DE GRÁFICOS.....	11
ABREVIATURAS E SIGLAS .....	13
NOMENCLATURA.....	14
RESUMO .....	16
1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivos.....	18
1.2 Motivação do trabalho .....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Fluxo de produção da Laminação a Frio .....	20
2.2 Tipos de Laminadores a Frio .....	21
2.3 Bobinadeiras de Laminador Sendzimir.....	25
2.3.1 Mandril de bobinadeira.....	26
2.4 Laminadores Sendzimir da ArcelorMittal Inox Brasil .....	30
2.4.1 Laminador de Bobinas nº 1 (LB1).....	30
2.4.2 Laminador de Bobinas nº 3 (LB3).....	32
2.4.3 Laminador de Bobinas nº 4 (LB4).....	33
2.5 Atrito no bobinamento .....	34
2.6 Esforço combinado de tração e dobramento da tira metálica .....	39
3 METODOLOGIA.....	41
3.1 Aplicação da metodologia em mordentes de mandril.....	41
3.2 Modelo físico .....	43
3.3 Materiais .....	45
3.4 Avaliação da capacidade dos mordentes .....	46
3.4.1 Modelo analítico para tração de bobinamento.....	48
3.4.2 Execução dos testes de tração direta.....	49
3.4.3 Execução dos testes de tração com variação do arco de contato.....	52
3.5 Medição do Atrito .....	54
3.5.1 Procedimento de medição do atrito .....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	58
4.1 Resultados da medição do atrito entre a tira e o segmento do LB1 .....	58

4.2	Resultados do modelo analítico para o mordente original do LB1.....	59
4.2.1	Cálculo da força de tração de bobinamento – projeto original.....	59
4.3	Resultados do modelo físico para o mordente original do LB1 .....	61
4.3.1	Medição da força de tração direta – projeto original.....	61
4.3.2	Medição da força de tração com variação do arco de contato - projeto original.... .....	64
4.4	Resultados do modelo analítico para o mordente alterado do LB1 .....	68
4.4.1	Cálculo da força de tração de bobinamento – projeto alterado .....	68
4.5	Resultados do modelo físico para o mordente alterado do LB1 .....	70
4.5.1	Medição da força de tração direta – projeto alterado .....	70
4.5.2	Medição da força de tração com variação do arco de contato – projeto alterado... .....	72
4.6	Resultados da medição do atrito entre a tira e o segmento do LB4.....	75
4.7	Resultados do modelo analítico para o mordente do LB4 .....	76
4.7.1	Cálculo da força de tração de bobinamento.....	76
4.8	Resultados do modelo físico para o mordente do LB4.....	77
4.8.1	Medição da força de tração direta.....	77
4.8.2	Medição da força de tração com variação do arco de contato.....	79
4.9	Resultados do modelo físico para o mordente do LB3 .....	85
4.9.1	Medição da força de tração direta.....	85
4.10	Discussão dos resultados dos três projetos avaliados.....	87
4.10.1	Análise dos resultados – Tração direta .....	88
4.10.2	Análise dos resultados – Tração de bobinamento .....	89
4.11	Análise de viabilidade para condição industrial.....	90
4.11.1	Aplicação do modelo analítico para tração de bobinamento .....	91
4.11.2	Execução dos testes no equipamento.....	92
5	CONCLUSÕES .....	95
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	96
	ABSTRACT .....	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	98
	ANEXO A .....	100
	ANEXO B .....	101
	ANEXO C .....	102
	ANEXO D .....	103

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Fluxo de produção da ArcelorMittal Inox Brasil. ....	20
FIGURA 2.2 - Laminador em linha ou trem de laminação. ....	21
FIGURA 2.3 - Laminador reversível.....	22
FIGURA 2.4 - Laminador duo reversível.....	22
FIGURA 2.5 - Laminador quadro reversível.....	23
FIGURA 2.6 - Laminador 6-H reversível. ....	23
FIGURA 2.7 - Laminador tipo Sendzimir.....	24
FIGURA 2.8 - Nomenclatura utilizada em laminador tipo Sendzimir.....	25
FIGURA 2.9 - Configuração de laminador Sendzimir.....	25
FIGURA 2.10 - Bobinadeira de laminador Sendzimir.....	26
FIGURA 2.11 - Conjunto do mandril.....	27
FIGURA 2.12 - Vista de corte transversal do mandril. ....	29
FIGURA 2.13 - a) Acionamento hidráulico do mordente, b) Retorno da régua por mola.....	29
FIGURA 2.14 - a) Acionamento hidráulico do mordente do LB1, b) Retorno da régua por mola. ....	31
FIGURA 2.15 - a) Projeto original do mordente do LB3, b) Projeto revisado do mordente do LB3. ....	32
FIGURA 2.16 - a) Acionamento hidráulico do mordente do LB4, b) Retorno da régua por mola. ....	33
FIGURA 2.17 - Simulação do atrito no prensa chapas. ....	36
FIGURA 2.18 - Simuladores de atrito.....	36
FIGURA 2.19 - Esboço do simulador.....	37
FIGURA 2.20 - Dispositivo para teste de atrito. ....	38
FIGURA 2.21 - Máquina de tração adaptada para teste de atrito.....	39
FIGURA 2.22 - Conformação de tira sob tração.....	39
FIGURA 3.1 - Fluxograma com a sequência de aplicação da metodologia.....	42
FIGURA 3.2 - Dispositivo para medição de tração direta. ....	44
FIGURA 3.3 - Dispositivo para medição de tração com arco de contato. ....	44
FIGURA 3.4 - Vista lateral do dispositivo de medição de tração com arco de contato.....	45
FIGURA 3.5 - Detalhe da aplicação de tração direta na tira. ....	47
FIGURA 3.6 - Tração na tira com arco de contato. ....	47

FIGURA 3.7 - Detalhe da aplicação de tração na tira com $\theta = 0$ rad.....	48
FIGURA 3.8 - Montagem do dispositivo de tração direta. ....	50
FIGURA 3.9 - Detalhe do posicionamento do segmento e da tira. ....	50
FIGURA 3.10 - Montagem do sensor ultrassônico. ....	51
FIGURA 3.11 - Unidade eletrônica para rampa de força.....	51
FIGURA 3.12 - Correlação de medidas do arco de contato.....	52
FIGURA 3.13 - Dispositivo para medição de tração com arco de contato .....	53
FIGURA 3.14 - Ilustração de um teste com arco de contato de $\theta = 3\pi/2$ rad. ....	53
FIGURA 3.15 - Arranjo do dispositivo de tração com arco de contato para medição de atrito. .....	54
FIGURA 3.16 - Detalhe da fixação da tira à célula de carga. ....	55
FIGURA 3.17 - Detalhe da tira conformada sobre o segmento. ....	56
FIGURA 3.18 - Conjunto montado para avaliação do atrito.....	57
FIGURA 4.1 - Ilustração da tira presa no mordente do LB1 .....	62
FIGURA 4.2 - Detalhe da alteração na geometria dos dentes da régua fixa do LB1.....	69
FIGURA 4.3 - Ação da força de dobramento da tira sobre a régua móvel do mordente do LB4 .....	84

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Especificações técnicas dos laminadores .....	30
TABELA 2.2 - Dados técnicos do mordente do mandril do LB1 .....	31
TABELA 2.3 - Dados técnicos do mordente do mandril do LB3 .....	33
TABELA 2.4 - Dados técnicos do mordente do mandril do LB4 .....	34
TABELA 3.1 - Composição química do aço inoxidável austenítico – AISI 304.....	46
TABELA 3.2 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico – AISI 304.....	46
TABELA 3.3 - Valores médios de rugosidades medidas nos segmentos e tiras metálicas.....	56
TABELA 4.1 - Resultado do modelo analítico para tração de bobinamento referente ao projeto original do LB1 .....	60
TABELA 4.2 - Pressão de alimentação do mordente do LB1.....	61
TABELA 4.3 - Rugosidades medidas no segmento do LB1, tiras e luva de aço .....	64
TABELA 4.4 - Resultado do modelo físico para tração de bobinamento no LB1 .....	67
TABELA 4.5 - Resultado do modelo analítico para tração de bobinamento referente ao projeto alterado do LB1 .....	70
TABELA 4.6 - Resultado do modelo físico para tração de bobinamento no projeto alterado do LB1 .....	73
TABELA 4.7 - Resultado do modelo analítico para tração de bobinamento referente ao projeto do LB4.....	76
TABELA 4.8 - Pressão de alimentação do mordente do LB4.....	78
TABELA 4.9 - Rugosidades medidas no segmento do LB4, tiras e luva de aço .....	80
TABELA 4.10-Resultado do modelo físico para tração de bobinamento no LB4.....	82
TABELA 4.11-Pressão de alimentação do mordente do LB3.....	85
TABELA 4.12-Resultado da tração de bobinamento no mandril do LB1 para tira de 1,25 m	91

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 4.1 - Repetibilidade na medição do atrito a seco entre tira e segmento do LB1....	58
GRÁFICO 4.2 - Influência da lubrificação no atrito tira/segmento do LB1.....	59
GRÁFICO 4.3 - Tração de bobinamento calculada para o projeto original do LB1.....	61
GRÁFICO 4.4 - Tração em tira de 0,050 m medida no mordente do LB1.....	62
GRÁFICO 4.5 - Tração em tira de 0,100 m medida no mordente do LB1.....	63
GRÁFICO 4.6 - Tração em tira de 0,150 m medida no mordente do LB1.....	63
GRÁFICO 4.7 - Tração x largura medida no mordente original do LB1.....	64
GRÁFICO 4.8 - Tração de bobinamento sem arco de contato no mordente do LB1.....	65
GRÁFICO 4.9 - Tração de bobinamento com $\theta = \pi/2$ rad. no mordente do LB1.....	65
GRÁFICO 4.10 - Tração de bobinamento com $\theta = \pi$ rad. no mordente do LB1.....	65
GRÁFICO 4.11 - Tração de bobinamento com $\theta = 3\pi/2$ rad. no mordente do LB1.....	66
GRÁFICO 4.12 - Tração de bobinamento com $\theta = 7\pi/4$ rad. no mordente do LB1.....	66
GRÁFICO 4.13 - Tração de bobinamento medida no projeto do LB1.....	67
GRÁFICO 4.14 - Tração de bobinamento medida e calculada do projeto do LB1.....	67
GRÁFICO 4.15 - Influência de $T_m$ e $T_p$ na tração de bobinamento medida para projeto do LB1.....	68
GRÁFICO 4.16 - Tração de bobinamento calculada para o projeto alterado do LB1.....	70
GRÁFICO 4.17 - Tração direta medida em tira de 0,050 m no mordente alterado do LB1....	70
GRÁFICO 4.18 - Tração direta medida em tira de 0,100 m no mordente alterado do LB1....	71
GRÁFICO 4.19 - Tração direta medida em tira de 0,150 m no mordente alterado do LB1....	71
GRÁFICO 4.20 - Tração direta x largura referente ao projeto alterado do LB1.....	71
GRÁFICO 4.21 - Tração de bobinamento sem arco de contato no mordente alterado do LB1.....	72
GRÁFICO 4.22 - Tração de bobinamento com $\theta = 3\pi/2$ rad. mordente alterado do LB1.....	72
GRÁFICO 4.23 - Tração de bobinamento medida no mordente alterado do LB1.....	73
GRÁFICO 4.24 - Tração de bobinamento medida e calculada para o mordente alterado do LB1.....	74
GRÁFICO 4.25 - Influência de $T_m$ e $T_p$ na tração de bobinamento para projeto alterado do LB1.....	74
GRÁFICO 4.26 - Influência da lubrificação no atrito tira/segmento do LB4.....	75
GRÁFICO 4.27 - Tração de bobinamento calculada para o projeto do LB4.....	77

GRÁFICO 4.28 - Tração em tira de 0,050 m medida no mordente do LB4. ....	78
GRÁFICO 4.29 - Tração em tira de 0,100 m medida no mordente do LB4. ....	78
GRÁFICO 4.30 - Tração em tira de 0,150 m medida no mordente do LB4. ....	79
GRÁFICO 4.31 - comportamento da tração x largura medida no mordente do LB4. ....	79
GRÁFICO 4.32 - Tração de bobinamento sem arco de contato no mordente do LB4. ....	80
GRÁFICO 4.33 - Tração de bobinamento com $\theta = \pi/2$ rad. no mordente do LB4. ....	81
GRÁFICO 4.34 - Tração de bobinamento com $\theta = \pi$ rad. no mordente do LB4. ....	81
GRÁFICO 4.35 - Tração de bobinamento com $\theta = 3\pi/2$ rad. no mordente do LB4. ....	81
GRÁFICO 4.36 - Tração de bobinamento com $\theta = 7\pi/4$ rad. no mordente do LB4. ....	82
GRÁFICO 4.37 - Tração de bobinamento medida no projeto do LB4. ....	83
GRÁFICO 4.38 - Tração de bobinamento medida e calculada no projeto do LB4. ....	83
GRÁFICO 4.39 - Influência de $Tm$ na tração de bobinamento medida para projeto do LB4. .	84
GRÁFICO 4.40 - Tração em tira de 0,050 m medida no mordente do LB3. ....	86
GRÁFICO 4.41 - Tração em tira de 0,100 m medida no mordente do LB3. ....	86
GRÁFICO 4.42 - Tração em tira de 0,150 m medida no mordente do LB3. ....	86
GRÁFICO 4.43 - comportamento da tração x largura medida no mordente do LB3. ....	87
GRÁFICO 4.44 - Tração direta x largura dos projetos dos três laminadores. ....	88
GRÁFICO 4.45 - Tração de bobinamento medida e calculada para os projetos do LB1 e LB4. .....	89
GRÁFICO 4.46 - Tração de bobinamento de tira de 1,250 m no mandril do LB1. ....	92
GRÁFICO 4.47 - Ganho em peso referente à redução do comprimento de ponta grossa no LB1. ....	94

## **ABREVIATURAS E SIGLAS**

LB1	Laminador de bobinas número 1
LB3	Laminador de bobinas número 3
LB4	Laminador de bobinas número 4

## NOMENCLATURA

### Letras Latinas

<b><i>A</i></b>	área [m <sup>2</sup> ]
<b><i>A<sub>p</sub></i></b>	área do pistão [m <sup>2</sup> ]
<b><i>C</i></b>	comprimento da régua móvel [m]
<b><i>d</i></b>	diâmetro do pistão [m]
<b><i>F<sub>1</sub></i></b>	força peso [N]
<b><i>F<sub>2</sub></i></b>	força medida pela célula de carga [N]
<b><i>F<sub>a</sub></i></b>	força de atrito [N]
<b><i>F<sub>b</sub></i></b>	força de flexão [N]
<b><i>F<sub>m</sub></i></b>	força de mola [N]
<b><i>F<sub>M</sub></i></b>	força de mordedura [N]
<b><i>F<sub>N</sub></i></b>	força normal [N]
<b><i>F<sub>r</sub></i></b>	força resistente [N]
<b><i>L</i></b>	largura da tira [m]
<b><i>n</i></b>	número de pistões
<b><i>P</i></b>	pressão [Pa]
<b><i>r</i></b>	raio da régua guia do mordente [m]
<b><i>R</i></b>	raio do mandril [m]
<b><i>t<sub>0</sub></i></b>	espessura da tira [m]
<b><i>TA</i></b>	tração no ponto A [N]
<b><i>TB</i></b>	tração de bobinamento [N]
<b><i>Tm</i></b>	tração direta no mordente [N]

## Letras Gregas

$\sigma$	tensão normal [Pa]
$\beta$	ângulo da superfície inclinada da régua móvel [grau]
$\theta$	arco de contato da tira com o mandril [rad.]
$\varphi$	arco de contato da tira com a régua guia do mordente [rad.]
$\mu$	atrito
$\rho$	raio de curvatura da matriz [m]

## RESUMO

Neste trabalho, é apresentado o desenvolvimento de uma metodologia para avaliação da capacidade dos mordentes de mandris das bobinadeiras de laminadores a frio tipo Sendzimir. Os mordentes são mecanismos compostos de réguas com atuação hidráulica, cuja função é prender a ponta da tira no início do processo de bobinamento e assim 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 de tira em função do arco de contato da tira com uma superfície cilíndrica similar ao mandril do laminador. O modelo também foi utilizado para caracterizar o atrito entre a tira e o mandril. De maneira geral, a prática de bobinamento considera que a aplicação da tração somente pode ser iniciada após o enrolamento de pelo menos 1,5 volta de tira no mandril, o que gera perda de rendimento físico nos laminadores. O objetivo principal deste trabalho é o de avaliar a capacidade dos mordentes dos mandris, 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. Os resultados da tração de bobinamento em função do arco de contato, medida no modelo físico, mostraram-se próximos daqueles obtidos no modelo analítico. Foi realizada também uma análise de viabilidade para a condição industrial, onde se demonstram os benefícios atingidos com aplicação da metodologia, tendo-se em vista a alta margem de contribuição dos aços planos. A adoção desta metodologia permitirá a avaliação da capacidade de outros projetos de mordente, a fim de se otimizar o processo de bobinamento de tiras.

*Palavras-chaves: Laminador, bobinadeira, mandril, mordente, atrito.*

# 1 INTRODUÇÃO

Há muito se tem discutido a respeito do ganho de produtividade dentro das empresas. O maior desafio das organizações, na atualidade, diz respeito à redução dos custos de produção e, principalmente ao aumento dos lucros, que são necessários a qualquer organização que tem como principal objetivo a permanência no mercado. Essa situação se deve principalmente à grande exigência do mercado consumidor em adquirir produtos com excelente qualidade e menor preço.

Dentro desse contexto, a ArcelorMittal Inox Brasil, tradicional produtor de aços planos inoxidáveis e siliciosos, avalia constantemente seus processos de produção através do monitoramento dos desvios, seja ele de qualidade ou de custo. Isso mostra que a empresa vive um novo tempo, onde a competitividade é muito mais acirrada e, portanto, exige uma atitude diferente.

O fluxo de produção de aços inoxidáveis na laminação a frio da ArcelorMittal Inox Brasil consiste, para grande maioria dos produtos, em três etapas:

- Recozimento e decapagem inicial;
- Laminação a frio;
- Recozimento e decapagem final.

Na primeira etapa, as bobinas originadas da laminação a quente, ainda em estado oxidado, são decapadas, preparadas e inspecionadas para a laminação a frio. Em geral, as bobinas têm de 20 a 25 toneladas de peso. Na segunda etapa, as bobinas são transformadas em bobinas laminadas a frio, com a espessura desejada pelo cliente final.

A laminação a frio 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.

A extensão das pontas descartadas como *heavy gauge* depende do equipamento. Como valor geral, utilizam-se cinco metros em cada extremidade como condição técnica mínima.

A condição padrão de enrolamento de ponta grossa no mandril é de 1,5 volta. O *benchmarking*, neste quesito, está na ArcelorMittal Gueugnon (França), onde se executa o

enrolamento de apenas  $\frac{3}{4}$  de volta no mandril.

Na ArcelorMittal Inox Brasil, iniciaram-se os testes com  $\frac{3}{4}$  de volta nos mandris dos laminadores Sendzimir no ano de 2000, mas esta prática foi paralisada por motivos de suspeita da geração de trincas nos segmentos dos mandris e também por causa dos constantes desprendimentos da ponta da tira do mordente. Desta forma, 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.

Neste trabalho, desenvolveu-se uma metodologia para avaliação da capacidade dos mordentes dos mandris das bobinadeiras dos laminadores a frio tipo 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 próprios segmentos dos mandris de três laminadores.

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. Este mesmo dispositivo foi utilizado para medir o atrito na interface entre a tira e o mandril para as condições a seco e lubrificado.

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.

## 1.1 Objetivos

Neste trabalho, é estudada e aplicada uma metodologia para avaliação de projetos de mordentes de mandris de laminadores, com o objetivo geral de:

- *Avaliar a capacidade dos mordentes dos mandris das bobinadeiras dos laminadores a frio tipo Sendzimir tendo se em vista a aplicação de tração com menos de uma volta de tira enrolada no mandril.*

A aplicação do método possibilita também alcançar os seguintes objetivos específicos:

- *Aumentar o rendimento físico dos laminadores através da redução do comprimento de ponta grossa;*

- *Definir os valores necessários de força dos mordentes, visando se o enrolamento de menos de uma volta de tira nos mandris;*
- *Identificar qual é o melhor projeto de mordente para a condição proposta de enrolamento de menos de uma volta de tira no mandril;*
- *Propor um método para determinar o atrito no processo de bobinamento de tiras.*

## **1.2 Motivação do trabalho**

A motivação principal deste trabalho está ligada à possibilidade de se aumentar o rendimento físico dos laminadores a frio de Inox da ArcelorMittal Inox Brasil. Sua contribuição como referência de estudos para avaliação da capacidade de mordente preenche a deficiência encontrada na literatura para mandris de bobinadeira. A possibilidade de ganhos de rendimento físico e a possibilidade de avaliação de outros projetos de mordente justificam o uso da metodologia proposta.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Fluxo de produção da Laminação a Frio

Segundo Guimarães (2009), em uma usina integrada, a produção de aços planos é realizada a partir de placas produzidas na aciaria, que são transferidas para a laminação a quente, conforme se apresenta na FIG 2.1. As placas são conformadas mecanicamente em laminadores a quente, sendo, em seguida, enroladas em forma de bobinas denominadas bobinas a quente, com peso em torno de vinte toneladas. A etapa seguinte é a de laminação a frio, que se inicia na linha de recozimento e decapagem, a fim de se promover o recozimento e a remoção de carepas, deixando o material pronto para ser laminado. O laminador Sendzimir promove a laminação do material propriamente dita e, finalmente, o processo de acabamento envolve o corte do material em bobinas ou tiras conforme o peso especificado pelo cliente, além da embalagem para transporte.

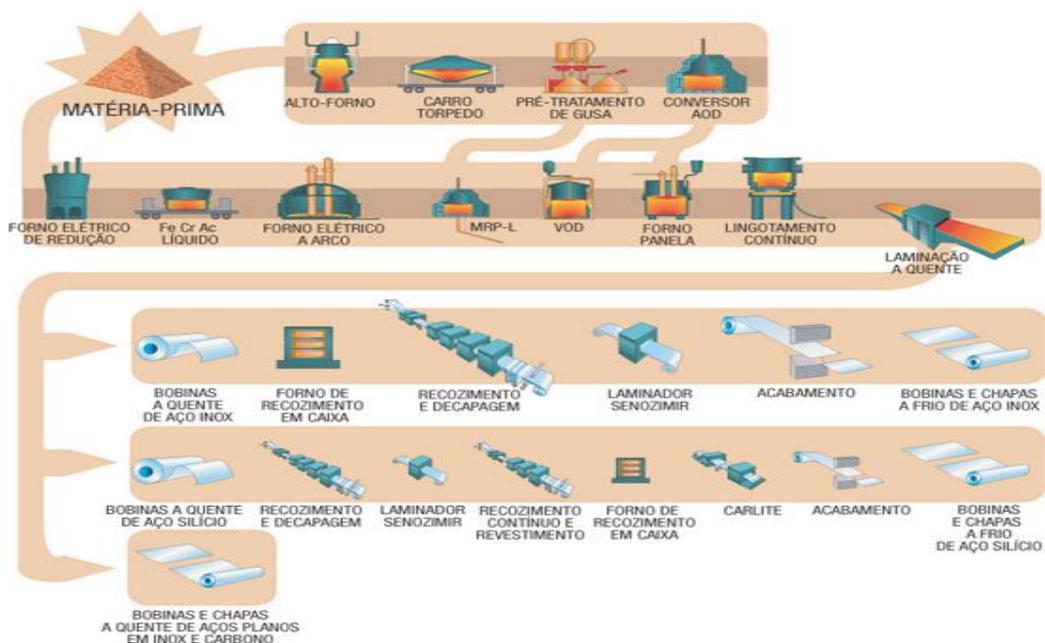


FIGURA 2.1- Fluxo de produção da ArcelorMittal Inox Brasil.

A laminação consiste no processo de deformação plástica dos metais, no qual o material passa entre cilindros. É o processo de transformação mecânica mais usado na prática, porque apresenta alta produtividade e um ótimo controle dimensional. Na laminação, o material é submetido a tensões compressivas altas, resultantes da ação de prensamento dos cilindros, e a tensões cisalhantes superficiais, resultantes do atrito entre os cilindros e o

material. As forças de tração avante e a ré, aliadas à força de atrito, são responsáveis pelo ato de puxar o material (Dieter, 1988).

Segundo Reed-Hill (1982), o termo laminação a frio indica que o processo é realizado em temperaturas bem abaixo do ponto de fusão do metal; no entanto, a temperatura que define o limite superior da faixa de trabalho a frio não pode ser exatamente definida, pois ela varia com a composição, bem como a velocidade e o grau de deformação. Uma regra utilizada é adotar, para trabalho a frio, temperaturas menores que a metade da temperatura de fusão, medida em escala absoluta.

## 2.2 Tipos de Laminadores a Frio

Um laminador consiste basicamente em cilindros, mancais, uma carcaça, chamada cadeira, para fixar estas partes, e um motor para fornecer potência aos cilindros com movimento de rotação. As forças envolvidas na laminação podem facilmente atingir milhares de toneladas; portanto, é necessária uma construção bastante rígida, além de motores muito potentes, para fornecer a potência requerida (Dieter, 1988).

Existem vários tipos de laminadores a frio destinados à laminação de produtos planos (chapas e tiras) e não planos (barras, arames, perfis, etc.). Embora possuam grande semelhança construtiva, aqui serão abordados apenas os laminadores destinados a produtos planos.

Conforme afirma Duprez (2000), dependendo da finalidade e do programa de produção, existem duas maneiras para laminar a frio. Uma delas utiliza o laminador de multicadeiras ou trem de laminação, conforme mostra a FIG 2.2.

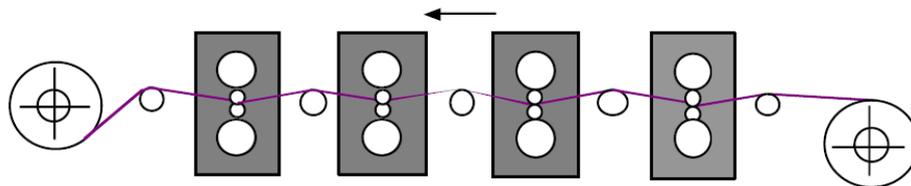


FIGURA 2.2 - Laminador em linha ou trem de laminação.  
FONTE – Duprez, 2000. p. 3.1.

Este laminador é constituído de uma desbobinadeira do lado de entrada e uma bobinadeira na saída, além dos rolos loucos existentes entre as cadeiras. Uma vez que, em cada cadeira se tem uma redução diferente, a velocidade de cada conjunto é ajustada automaticamente.

Um trem de laminação pode ter duas, três ou quatro cadeiras de laminação, dependendo da redução total requerida. Entretanto, a redução total é obtida em apenas um passe de laminação.

A outra maneira para laminar a frio é utilizar laminadores reversíveis, conforme mostrado na FIG. 2.3.

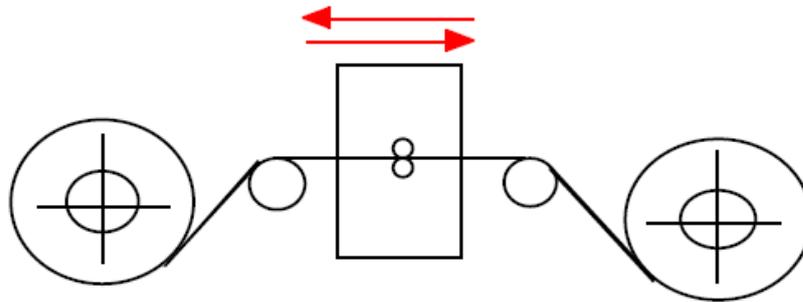


FIGURA 2.3 - Laminador reversível.  
FONTE – Duprez, 2000. p. 3.2.

A direção da laminação pode ser alternada da direita para esquerda e da esquerda para direita. Uma desbobinadeira permite a introdução e preparação da próxima bobina durante o processo de laminação; logo, este conjunto é utilizado apenas durante o primeiro passe.

Existem vários tipos de laminadores reversíveis. O mais simples é o laminador duo, que é composto por dois cilindros de laminação, conforme se apresenta na FIG. 2.4. Os cilindros possuem diâmetros iguais, com grandes dimensões, a fim de suportar a força de separação gerada pela laminação.

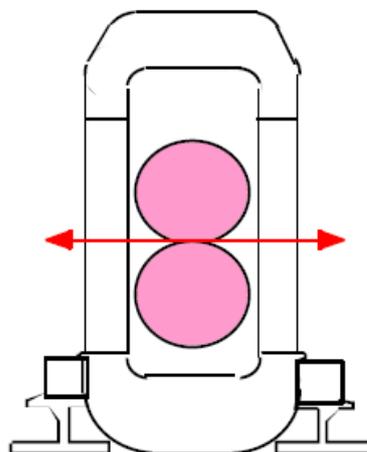


FIGURA 2.4 - Laminador duo reversível.  
FONTE – Duprez, 2000. p. 3.2.

Segundo Dieter (1988), pode-se obter uma grande diminuição da potência necessária na laminação com o uso de cilindros de diâmetros menores. Entretanto, como esses cilindros possuem baixa resistência mecânica, têm que ser suportados por cilindros de encosto, com diâmetros maiores. O laminador desse tipo mais simples é o laminador quádruo, que está apresentado na FIG. 2.5.

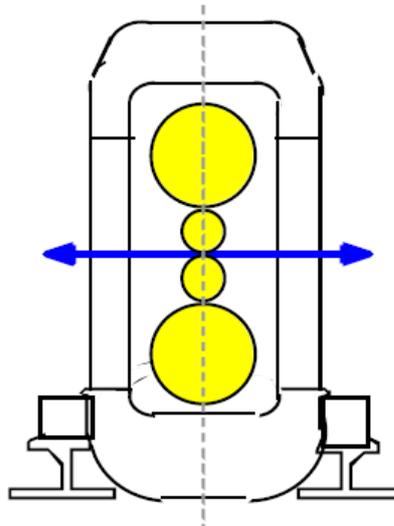


FIGURA 2.5- Laminador quádruo reversível.  
FONTE – Duprez, 2000. p. 3.3.

Outro laminador utilizado é o chamado 6-H, que possui dois cilindros de trabalho e quatro cilindros de encosto. Conforme Duprez (2000), existem dois arranjos possíveis para os laminadores 6-H, os quais são apresentados na FIG 2.6.

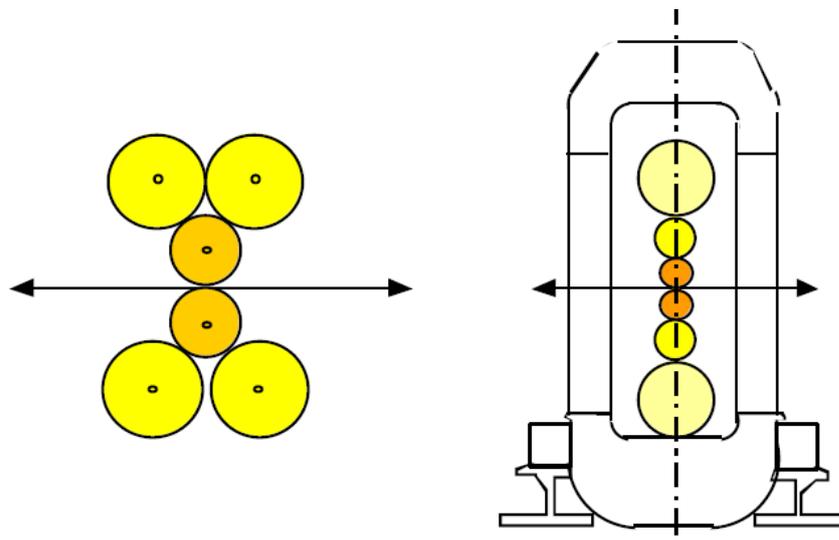


FIGURA 2.6- Laminador 6-H reversível.  
FONTE – Duprez, 2000. p. 3.5.

Visando reduzir ao máximo o diâmetro do cilindro de trabalho, a fim de aumentar a capacidade de redução da espessura da tira e as condições gerais de laminação, Rohn por volta de 1925 propôs a utilização de laminadores com dez ou dezoito cilindros de encosto. O conceito básico de Rohn foi desenvolvido com sucesso por Tadeusz Sendzimir, tendo grande aceitação em todo o mundo, particularmente para a laminação de aços inoxidáveis e aços elétricos (Roberts, 1978). Assim, surgiu o modelo Sendzimir.

Laminadores tipo Sendzimir são conhecidos mundialmente pela capacidade de laminar bobinas de materiais extremamente duros e de espessuras muito finas. O pequeno diâmetro do cilindro de trabalho permite elevadas reduções em materiais duros, tais como aços inoxidáveis e elétricos. Além disso, fornece excelente acabamento superficial. A FIG. 2.7 apresenta o arranjo da cadeia de laminação de um laminador Sendzimir.

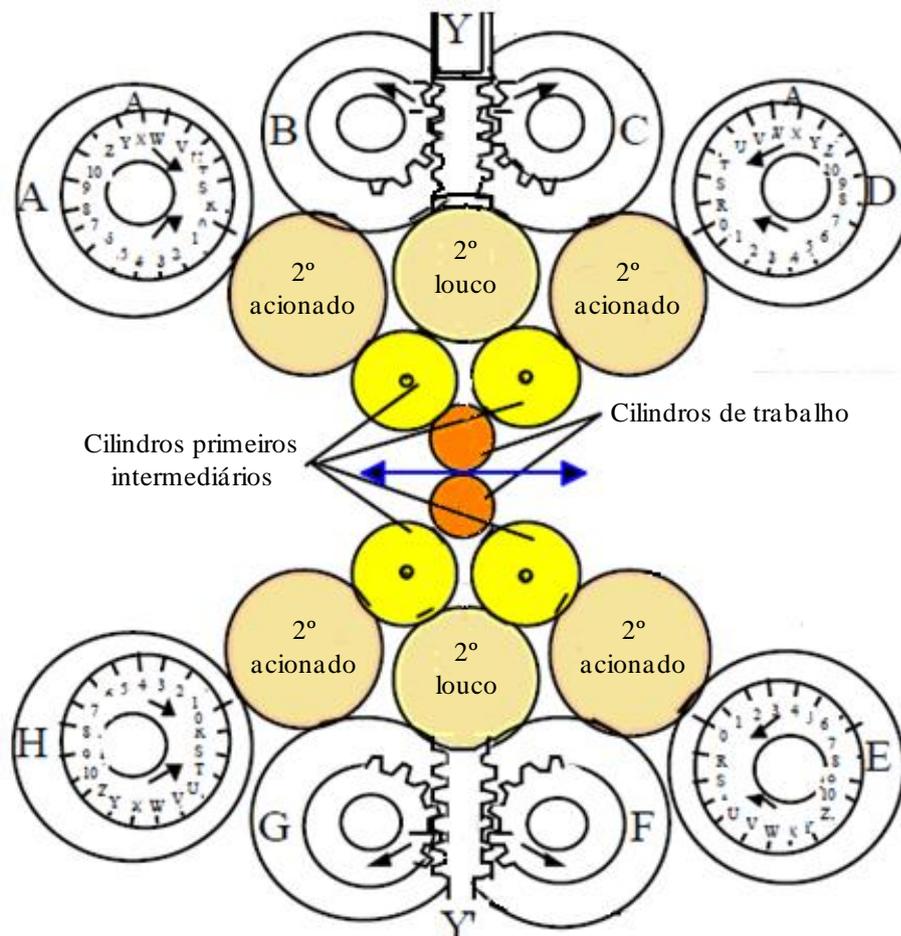


FIGURA 2.7 - Laminador tipo Sendzimir.  
FONTE – Duprez, 2000. p. 3.5.

Os laminadores Sendzimir possuem uma nomenclatura própria, a qual é apresentada na FIG. 2.8.

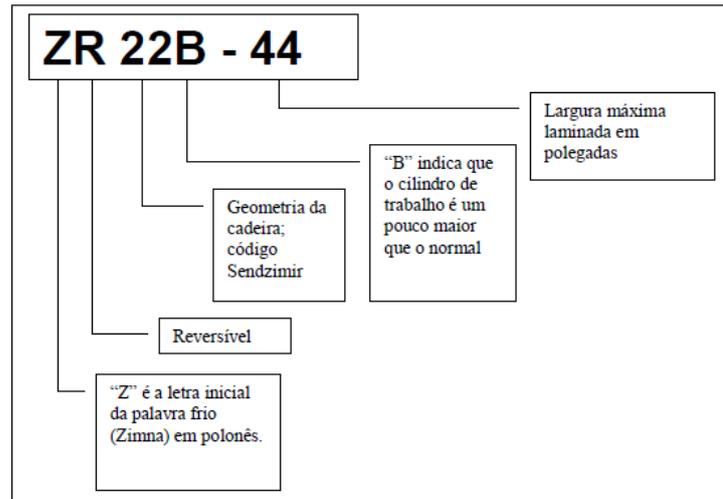


FIGURA 2.8- Nomenclatura utilizada em laminador tipo Sendzimir.  
 FONTE – Neto, 2006.

### 2.3 Bobinadeiras de Laminador Sendzimir

Além da cadeira de laminação, um laminador Sendzimir possui ainda mais quatro conjuntos principais: 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 esquerda, conforme mostrado na FIG 2.9. Os passes seguintes são realizados via bobinadeiras; de acordo com o número de passes, a bobina pode ser retirada tanto na bobinadeira direita quanto na esquerda.

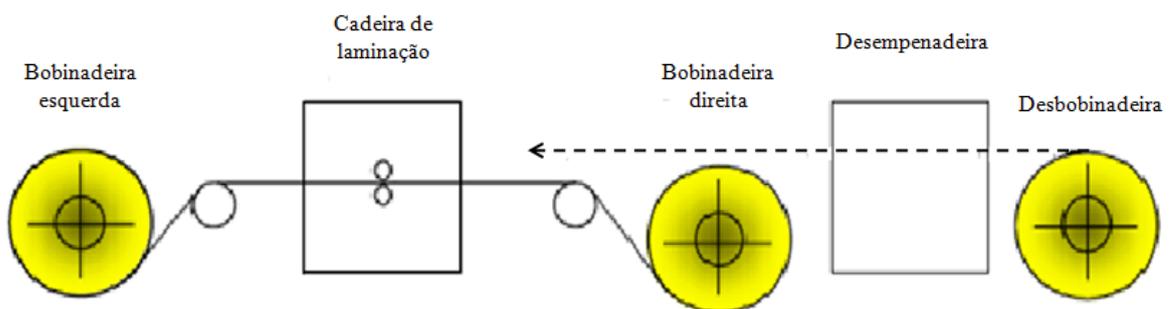


FIGURA 2.9 – Configuração de laminador Sendzimir.

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 rígidos ou expansivos. A FIG. 2.10 apresenta um modelo típico de uma bobinadeira utilizada em laminadores Sendzimir.



FIGURA 2.10 – Bobinadeira de laminador Sendzimir.  
 FONTE – T. Sendzimir, Inc., 2010.

Existem basicamente dois tipos de bobinadeiras: uma que utiliza mandris rígidos, outra, mandris expansíveis. A escolha depende do próximo processo a que a tira será submetida. Se o destino da bobina for uma linha de recozimento contínuo, a melhor escolha são os mandris expansíveis, mas, se forem os fornos de recozimento em caixa, devem-se utilizar mandris rígidos. Laminadores com mandris rígidos necessitam de um conjunto adicional para rebobinar a tira em um mandril retrátil, com tensão relativamente baixa, visando o recozimento do material em fornos de recozimento em caixa. Uma tira de espessura menor que um milímetro, bobinada sob alta tração, não pode ser colocada diretamente no forno, pois haveria o colamento das espiras (Duprez, 2000).

Como a maioria das laminações a frio possui linhas contínuas, serão abordadas apenas as bobinadeiras que utilizam mandris expansíveis.

### 2.3.1 Mandril de bobinadeira

Os laminadores mais novos possuem mandris dotados de sistema de expansão e contração, para adequar seu diâmetro em relação ao diâmetro nominal da bobina. A contração do mandril permite as operações de introdução e retirada das bobinas; a expansão do mandril, por sua vez, é necessária para fixar as bobinas ao mandril. Este mandril é utilizado nos processos que exigem elevadas trações; por esta razão, possui sistema de contração controlada, a fim de limitar a compressão radial sobre o mesmo.

A FIG. 2.11 apresenta o projeto moderno de um mandril expansível, onde se encontram numerados os principais componentes, a fim de facilitar o entendimento dos sistemas de acionamento e expansão que serão descritos adiante. A seção superior da FIG.

2.11 mostra a parte de trás do conjunto onde se encontra montado o cilindro hidráulico rotativo de expansão do mandril; na seção inferior, é mostrado o complemento do conjunto, o mandril propriamente dito.

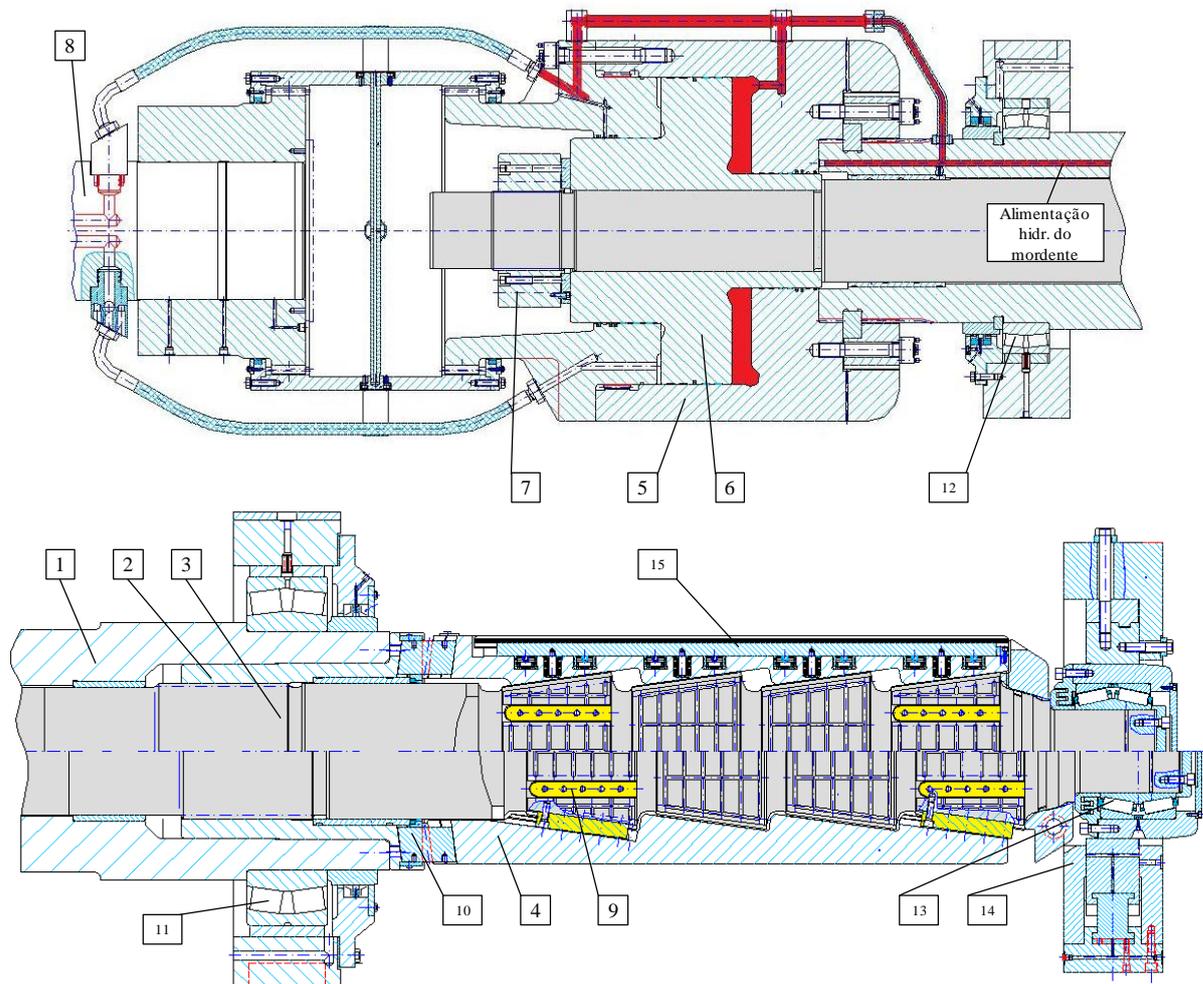


FIGURA 2.11- Conjunto do mandril.

O acionamento do mandril é feito através da transmissão de torque do eixo de saída do redutor 1 para o cubo estriado 2, chegando até o eixo piramidal 3. O eixo piramidal passa por dentro do eixo oco de saída do redutor, guiado por buchas de bronze. O mandril completo, incluindo o cilindro hidráulico rotativo 5, é montado no interior do redutor sustentado pelos rolamentos 11 e 12. Nos mandris projetados para processo de materiais largos, é previsto um terceiro rolamento 13, montado na extremidade do eixo piramidal. Esse rolamento é sustentado por uma estrutura articulada, chamada de mancal móvel, que se abre nos momentos de introdução e retirada da bobina.

O sistema de expansão e contração do mandril é realizado através de atuação hidráulica sobre o êmbolo 6, o qual está vinculado ao eixo piramidal através da porca de fixação 7. A alimentação hidráulica para o cilindro rotativo de expansão e para o mordente do mandril, que será apresentado posteriormente, é feita por uma válvula rotativa, montada na parte de trás do cilindro rotativo. Os segmentos 4 são ligados ao eixo piramidal pelas chavetas de guia 9, as quais permitem movimento axial relativo entre os segmentos e o eixo.

Quando o eixo piramidal é deslocado para a esquerda, conforme mostrado na parte superior da FIG 2.11, através da alimentação hidráulica na câmara maior do cilindro rotativo, destacada em vermelho, ocorre o movimento relativo das rampas do eixo com as superfícies inclinadas dos segmentos. Os segmentos, por sua vez, se movem radialmente, guiados pelas chavetas de guia 9, o que promove aumento do diâmetro do mandril, ou seja, expansão.

A contração do mandril é obtida pelo movimento contrário do eixo piramidal, através de alimentação hidráulica na câmara traseira do cilindro rotativo. Dessa forma, os segmentos se movem radialmente, reduzindo o diâmetro do mandril. Como o movimento do eixo tende a deslocar os segmentos para a direita, são previstas as chavetas 10, para retenção dos mesmos.

Alguns mandris não possuem mecanismos para prender a ponta da tira, a fim de dar início no bobinamento. Nesse caso, a ponta da tira é colocada sobre o mandril manualmente e fixada com fita adesiva. Em seguida, gira-se o mandril para acumular algumas voltas antes da aplicação da tração (Roberts, 1978).

Outros mandris utilizam enroladores de correia para enrolar a tira. Esse conjunto, também chamado de *belt wrapper*, é constituído de correias planas, guiadas por rolos que se moldam perfeitamente sobre o diâmetro externo do mandril, fazendo com que a tira seja conformada e enrolada sobre o mesmo. Da mesma forma, a tração só pode ser aplicada após o enrolamento de várias voltas no mandril.

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. Esses mecanismos são montados em um dos quatro segmentos do mandril e são compostos por réguas que são atuadas por pressão hidráulica proveniente do cilindro rotativo de expansão. A FIG. 2.12 apresenta uma vista de corte do mandril, com o detalhe da localização do mordente, e a FIG. 2.13 mostra um modelo típico de mordente utilizado nos mandris.

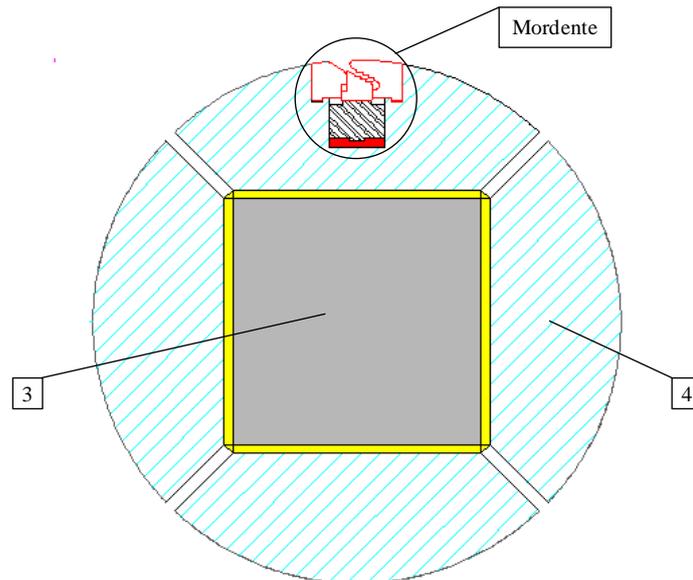


FIGURA 2.12- Vista de corte transversal do mandril.

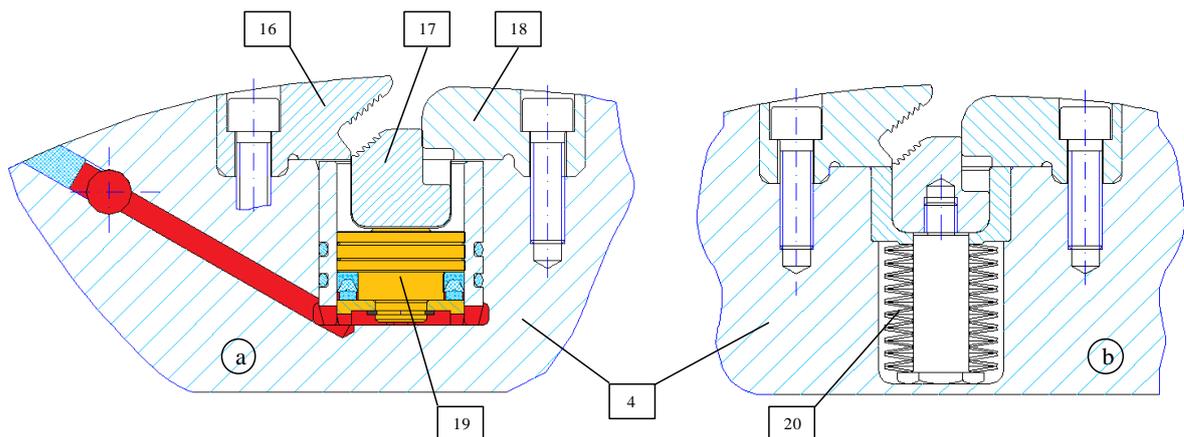


FIGURA 2.13 - a) Acionamento hidráulico do mordente, b) Retorno da régua por mola.

A atuação hidráulica do mordente é feita em conjunto com a expansão do mandril, uma vez que câmara maior do cilindro rotativo possui comunicação com um furo condutor existente na parede do eixo de saída do redutor, conforme destacado em cor vermelha na FIG 2.11. Este furo condutor, por sua vez, está conectado ao segmento que contém o mordente.

Através da FIG. 2.13(a), observa-se que a pressão hidráulica atua na superfície inferior do pistão 19, cuja quantidade é uma particularidade de cada projeto, 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, cuja quantidade também depende de cada projeto, força a régua móvel para baixo, conforme mostrado na FIG 2.13(b).

## 2.4 Laminadores Sendzimir da ArcelorMittal Inox Brasil

A ArcelorMittal Inox Brasil, possui em sua planta de Timóteo-MG, quatro laminadores Sendzimir, sendo três deles destinados à produção de aços inoxidáveis e o quarto destinado à produção de aços elétricos. Esses equipamentos são internamente conhecidos pelas iniciais de Laminador de Bobinas, seguidas pela numeração do equipamento. Assim, o laminador de bobinas nº 1 é chamado de LB1; o laminador de bobinas nº 2 é chamado de LB2 e assim por diante.

Embora exista uma grande semelhança construtiva entre os laminadores, serão abordados, neste trabalho, apenas os laminadores de aços inoxidáveis, cujas especificações estão apresentadas na TAB.2.1.

TABELA 2.1  
Especificações técnicas dos laminadores.

Laminador	LB1	LB3	LB4
Tipo	ZR 22S-52"	ZR 21BB-63"	ZR 21BB-54"
Tração máxima da tira	350 kN	600 kN	500 kN
Velocidade máxima de processo	7,64 m/s	8,34 m/s	13,34 m/s
Material laminado	Aço inox	Aço inox	Aço inox
Largura mínima da tira	0,800 m	0,800 m	0,900 m
Largura máxima da tira	1,32 m	1,60 m	1,35 m
Espessura mínima da tira	0,30E-3 m	0,38E-3 m	0,20E-3 m
Espessura máxima da tira	6,0E-3 m	8,0E-3 m	5,0E-3 m
Peso máximo da bobina	150 kN	250 kN	300 kN
Diâmetro máximo da bobina	1,83 m	2,10 m	2,10 m

Fonte – Manuais de operação e manutenção dos equipamentos.

### 2.4.1 Laminador de Bobinas nº 1 (LB1)

Este laminador foi fabricado pela empresa americana Waterbury Farrel e entrou em operação no ano de 1977. O LB1 faz parte do fluxo produtivo de planos inoxidáveis da categoria fino (< 1 mm), que tem ampla aplicação na fabricação de fogões, refrigeradores, cutelaria, baixelas, panelas, moedas, tubos, fachada de prédios, revestimento de elevadores, entre outras. Esporadicamente, produz também aço silício *GNO* (Grão Não Orientado), que tem aplicação na fabricação de núcleos de geradores e motores elétricos. Sua capacidade de

produção é de 87 mil toneladas por ano.

O projeto do mordente do LB1 utiliza réguas fabricadas em aço, com as seguintes especificações:

- Régua mordente móvel em aço SAE 3112, com endurecimento dos dentes pelo processo de cementação para dureza de 60 HRC;
- Régua mordente fixa em aço SAE 4340 tratada termicamente para dureza de 36 a 40 HRC;
- Régua guia em aço SAE 4140, tratada termicamente para dureza de 28 a 32 HRC.

A FIG. 2.14 apresenta o projeto do mordente do LB1.

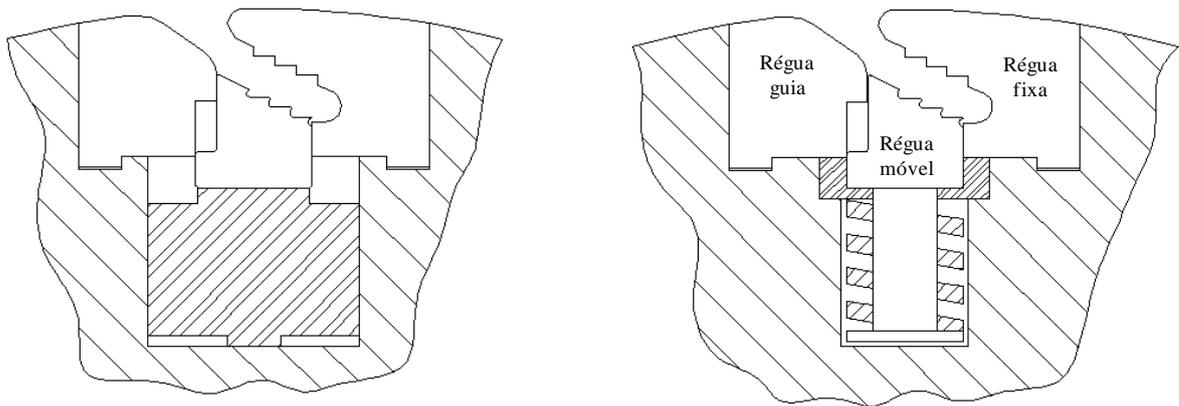


FIGURA 2.14 - a) Acionamento hidráulico do mordente do LB1, b) Retorno da régua por mola.

Este projeto se destaca dos demais pelo número de pistões, pelo comprimento e inclinação da régua móvel e pela forma geométrica das réguas, principalmente da régua guia, onde ocorre o primeiro dobramento da tira. A TAB. 2.2 apresenta as principais características do mordente do LB1.

TABELA 2.2

Dados técnicos do mordente do mandril do LB1.

Equip.	Nº de pistões ( $n$ )	Ø pistão $d$ [m]	Área dos pistões $A_t$ [m <sup>2</sup> ]	Pressão hidr. do mordente $P$ [MPa]	Comp. $C$ régua móvel [m]	Inclinação da régua móvel $\beta$
LB1	4	6,35E-2	1,267E-2	10	0,80	25°

### 2.4.2 Laminador de Bobinas nº 3 (LB3)

Fabricado pela empresa alemã Mannesmann Demag na década de 80, entrou em operação em 1985 e sofreu sua primeira reforma em 2008, quando todo o sistema de controle, até então analógico, foi substituído por um sistema digitalizado. Faz parte do fluxo produtivo de planos inoxidáveis da categoria grosso, com espessura final  $> 1$  mm, que tem ampla aplicação na fabricação de bens de capital, tais como tanques de armazenamento de bebidas e elevadores; também é muito utilizado na construção civil e no setor automotivo. Esporadicamente produz também aço silício *GNO* (Grão Não Orientado), que tem aplicação na fabricação de núcleos de geradores e motores elétricos. Sua capacidade de produção é de 222 mil toneladas por ano.

O projeto do mordente do LB3 utiliza réguas fabricadas em aço, com as seguintes especificações:

- Régua mordente móvel em aço conforme norma DIN 30CrNiMo8, beneficiado para 1230 MPa a 1430 MPa, com endurecimento dos dentes pelo processo de detonação LW-1 N30, que confere dureza superficial em torno de 70 HRC;
- Régua mordente fixa em aço conforme norma DIN 30CrNiMo8, beneficiado para 1230 MPa a 1430 MPa, com endurecimento dos dentes pelo processo de detonação LW-1 N30, que confere dureza superficial em torno de 70 HRC;
- Régua guia em aço conforme norma DIN 30CrNiMo8, beneficiado para 1230 MPa a 1430 MPa.

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 FIG. 2.15(a) apresenta o projeto original; a FIG 2.15(b), o projeto modificado.

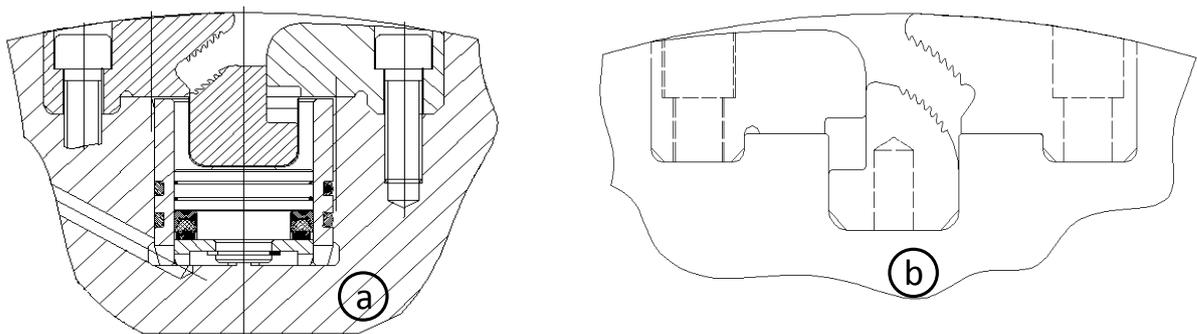


FIGURA 2.15 - a) Projeto original do mordente do LB3, b) Projeto revisado do mordente do LB3.

Foi identificada uma não conformidade no projeto revisado especificamente na régua móvel do mordente. Observando-se a FIG. 2.15(b), percebe-se que os dentes da régua ficaram em posição invertida, com inclinação favorável à saída da tira. Outro fator negativo dessa posição dos dentes é a possibilidade de que se quebrem durante a introdução da tira no mordente. A TAB. 2.3 apresenta as principais características do mordente do LB3.

TABELA 2.3  
Dados técnicos do mordente do mandril do LB3.

Equip.	Nº de pistões ( $n$ )	Ø pistão $d$ [m]	Área dos pistões $A_p$ [m <sup>2</sup> ]	Pressão hidr. do mordente $P$ [MPa]	Comp. $C$ régua móvel [m]	Inclinação da régua móvel $\beta$
LB3	10	4,50E-2	1,59E-2	15	1,71	40°

#### 2.4.3 Laminador de Bobinas nº 4 (LB4)

O LB4 é o mais novo laminador da laminação a frio de inoxidável. Entrou em operação em 1997 e faz parte do fluxo produtivo de planos inoxidáveis da categoria fino (< 1 mm), cuja destinação é a mesma dos aços produzidos no LB1. Sua capacidade de produção é de 107 mil toneladas por ano.

O projeto do mordente do LB4 é basicamente igual ao projeto original do LB3, com diferenças na quantidade de pistões e no comprimento das réguas, que são fabricadas conforme as mesmas especificações do projeto do LB3. A FIG. 2.16 apresenta o projeto do mordente do LB4.

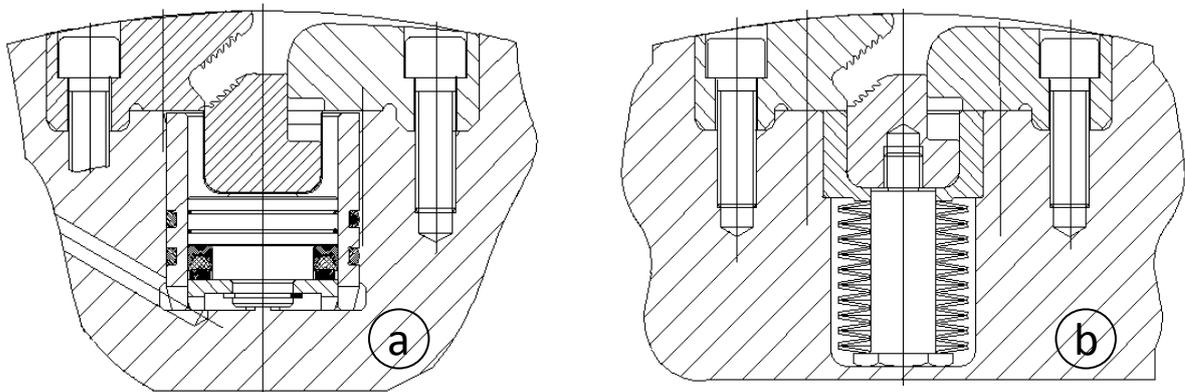


FIGURA 2.16- a) Acionamento hidráulico do mordente do LB4, b) Retorno da régua por mola.

A TAB. 2.4 apresenta as principais características do mordente do LB4.

TABELA 2.4  
Dados técnicos do mordente do mandril do LB4.

Equip.	Nº de pistões ( $n$ )	Ø pistão $d$ [m]	Área dos pistões $A_t$ [m <sup>2</sup> ]	Pressão hidr. do mordente $P$ [MPa]	Comp. $C$ régua móvel [m]	Inclinação da régua móvel $\beta$
LB4	8	4,50E-2	1,27E-2	14	1,31	40°

## 2.5 Atrito no bobinamento

Segundo Johnson (1985), o contato entre dois corpos pode ser distinguido entre *conforme* e *não conforme*. Um contato é dito ser *conforme*, se as superfícies dos dois corpos se ajustam perfeitamente, sem deformação. Corpos com perfis dissimilares são ditos serem *não conformes*; quando colocados em contato sem deformação, eles se tocam primeiro em um ponto (contato pontual), ou ao longo de uma linha (contato em linha). Contatos em linha aparecem quando os perfis dos corpos são *conformes* em uma direção e *não conformes* na direção perpendicular. A área de contato entre corpos *não conformes* é geralmente pequena, comparada com as dimensões dos mesmos.

Segundo Folle (2008), existem três condições distintas de lubrificação que determinam a influência do atrito na conformação de chapas:

- Condição a seco, na qual não existe lubrificação na interface e somente estão presentes camadas de óxidos na matriz ou na tira. O atrito é governado pelo contato entre os picos da rugosidade superficial de cada parte em contato;
- Condição hidrodinâmica, quando uma espessa camada de lubrificante está presente entre a matriz e tira;
- Lubrificação de contorno, quando um filme de lubrificante envolve todo o material a ser conformado. Essa situação resulta em uma lubrificação intermediária entre a condição de atrito seco e lubrificação hidrodinâmica. É a situação mais amplamente encontrada em conformação de metais.

Quanto à rugosidade superficial, pode-se esperar grande influência sobre o atrito. Segundo Norton (2004), com acabamentos superficiais extremamente finos, correspondentes

a uma faixa de  $R_a$  inferior a  $0,25 \times 10^{-6}$  m, o atrito realmente aumenta podendo dobrar de valor, devido a um aumento da área real de contato. Com acabamentos muito grosseiros, correspondentes a  $R_a$  acima de  $1,25 \times 10^{-6}$  m, o atrito também aumenta levemente, devido à energia necessária para suplantar interferências entre asperezas, bem como para cisalhar as ligações adesivas formadas durante o escorregamento.

Em um processo de bobinamento, há o contato entre duas ou mais superfícies, que pode ser tanto *conforme* quanto *não conforme*. O contato entre a tira e a superfície do mandril, bem como o contato entre as espiras, pode ser considerado contato *conforme*, ao passo que, entre as réguas do mordente e a tira, há o contato misto, pois ocorre também o contato em linha. O atrito presente no processo pode ser a seco ou lubrificado.

Quando se utiliza mandril sem mordente, a tração somente pode ser aplicada na tira após o enrolamento de mais que uma volta no mandril, uma vez que 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 tira (Turley, 1974). Estudos feitos por Wilkening et al, 1965 apud Turley (1974), indicam valores de atrito estático entre espiras de 0,15 a 0,18 e atrito dinâmico de 0,10 a 0,13.

Mesmo em mandril equipado com mordente, os fabricantes recomendam a aplicação de tração na tira após ter sido enrolada mais de uma volta no mandril. Conforme o Manual do Laminador ZR 21 BB 44 da Hitachi (1975), é recomendado que haja de duas a três voltas de tira sobre o mandril antes de se aplicar a tração. Segundo Turley (2006), é preciso que seja enrolada no mínimo uma volta no mandril. Entretanto, no Manual do Laminador ZR 21 BB-63, fabricado pela Mannesmann Demag (1980), informa um ângulo mínimo de abraçamento da tira no mandril de  $345^\circ$ . Daí a importância de se conhecer o atrito entre a tira e o mandril.

Segundo Sefton (2000), existem basicamente duas formas para medição do atrito: por medição direta, ou indireta. Na medição indireta, o atrito pode ser obtido, por exemplo, medindo-se a força tangencial e a força normal; através de equações matemáticas, determina-se o atrito médio para uma determinada área de contato. Na medição direta, utilizam-se sensores especiais, com os quais é possível determinar a distribuição do atrito dentro de uma área de contato aparente. Será abordada, neste trabalho, apenas a medição indireta.

O modelo mais simples de medição indireta está apresentado na FIG. 2.17.

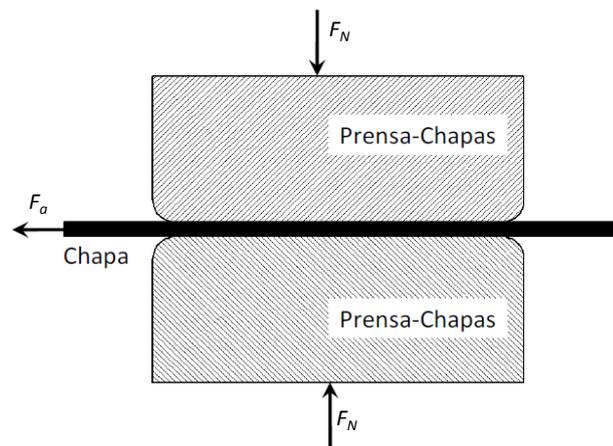


FIGURA 2.17 – Simulação do atrito no prensa-chapas.  
FONTE – Folle, 2008.

Com a medição das forças de atrito  $F_a$  e da força normal  $F_N$ , o atrito  $\mu$  pode ser encontrado pela relação indicada na EQ. (2.1).

$$\mu = \frac{F_a}{F_N} \quad (2.1)$$

Vallance; Matlock (1992) e Sefton (2000) apresentam outros três modelos para medição indireta de atrito, os quais estão apresentados na FIG 2.18.

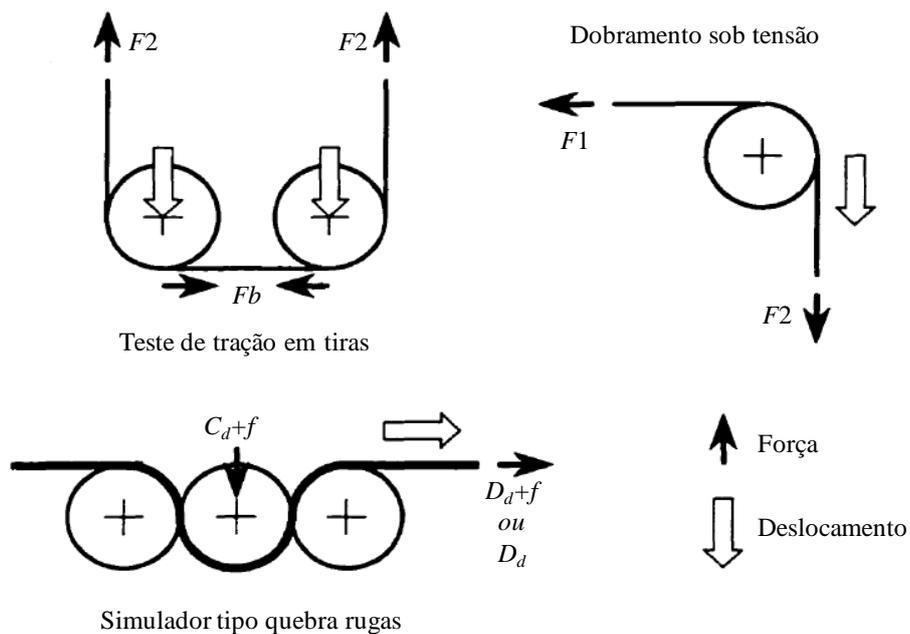


FIGURA 2.18 – Simuladores de atrito.  
FONTE: Sefton, 2000.

Todos os simuladores para medição de atrito apresentados na FIG. 2.18 combinam dobramento, tração e atrito. O atrito médio é calculado através da medição das forças indicadas na FIG. 2.18.

Estes simuladores utilizam rolos fixos, ou rotativos. Quando são usados rolos rotativos, o efeito do atrito é eliminado, e as forças requeridas para dobramento e tração da tira são isoladas. Com rolos fixos, o atrito tem que ser vencido; portanto, os testes devem ser conduzidos das duas formas; assim, a força de atrito pode ser determinada (Sefton, 2000).

Um simulador de conformação de tiras foi desenvolvido por Wilson et al (1991), baseado no modelo de dobramento sob tensão. Trata-se de um dispositivo para investigação do atrito e da lubrificação na conformação de tiras metálicas. Nesse simulador, são utilizados dois atuadores lineares para aplicação de força nas extremidades da tira de metal, a qual está parcialmente enrolada em um pino cilíndrico. Duas células de carga monitoram a carga transmitida antes e depois do cilindro. A FIG. 2.19 apresenta o esboço do simulador.

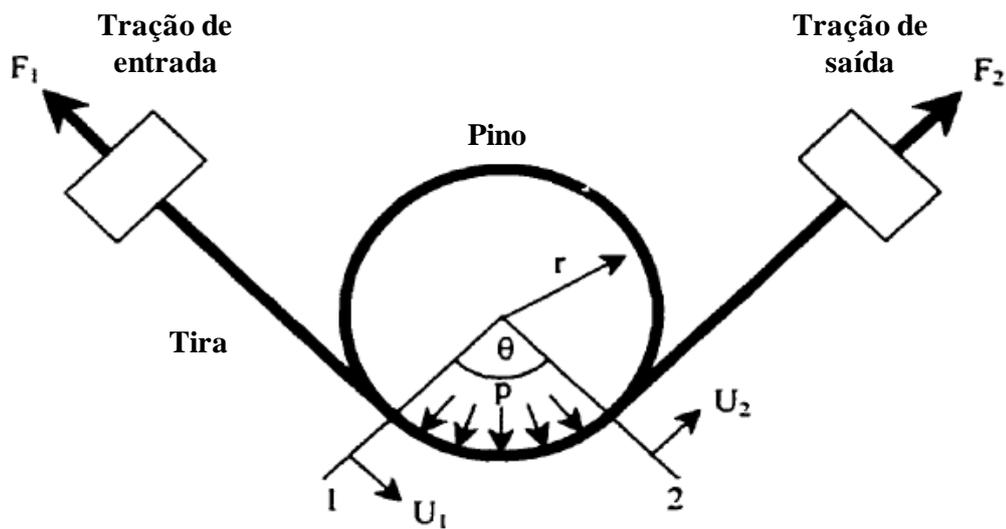


FIGURA 2.19 – Esboço do simulador.  
FONTE: Wilson et al, 1991.

Com este modelo, é possível estimar o valor do atrito médio ( $\mu$ ) na interface tira e pino através da EQ. (2.2).

$$\mu = 2 \frac{(F2 - F1 - Fb)}{\theta(F1 + F2)} \quad (2.2)$$

onde  $F1$  e  $F2$  são as forças realizadas pelos atuadores;  $Fb$  é a força de flexão da tira, e  $\theta$  é o

arco de contato formado entre a tira e o cilindro.

A diferença entre as forças ( $F1$ ) e ( $F2$ ) é devida ao atrito ( $\mu$ ) e à força requerida para flexão da tira ( $Fb$ ), que, segundo Swift (1948), pode ser obtida através da EQ. (2.3).

$$Fb = \frac{\sigma_y \cdot t_0^2 \cdot L}{2 \cdot R} \quad (2.3)$$

onde  $\sigma_y$  é o limite de escoamento,  $t_0$  e  $L$  são respectivamente a espessura e largura da tira, e  $R$  é o raio do cilindro.

Um sistema similar foi utilizado por Budinski (2001), que trata de um método padronizado pela American Society for Testing and Materials – ASTM G143 (2009), para medição do atrito de esteiras flexíveis de couro ou tecido em contato com rolos transportadores. Segundo Budinski, o conhecimento do atrito para esses casos é fundamental, uma vez que um baixo valor de atrito pode implicar deslizamento e avarias na esteira, ou nos rolos, enquanto que um atrito elevado pode causar sobrecarga nos motores de acionamento dos rolos.

A norma ASTM G143 (2009) apresenta dois dispositivos para avaliação do atrito. O primeiro, que se apresenta na FIG. 2.20, utiliza um motor linear para fazer o deslocamento da tira, que também está presa em um peso, uma célula de carga para medição de força e um sistema computacional para aquisição e análise dos dados.

Outra configuração possível é a adaptação de uma máquina de ensaio de tração, conforme mostra a FIG. 2.21.

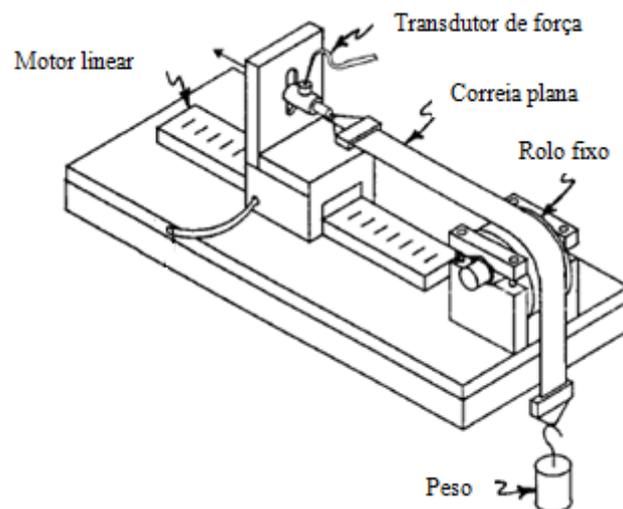


FIGURA 2.20 – Dispositivo para teste de atrito.  
FONTE – ASTM G 143, 2009.

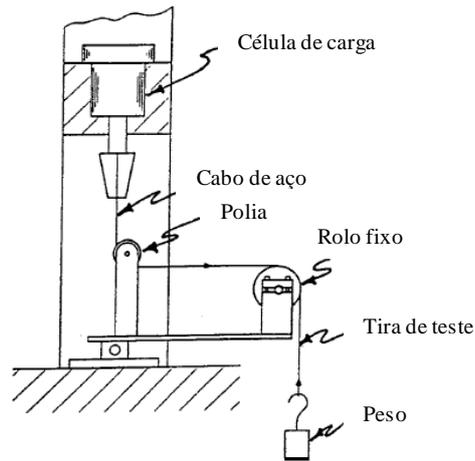


FIGURA 2.21 – Máquina de tração adaptada para teste de atrito.  
 FONTE – ASTM G 143, 2009.

Considerando que o atrito é constante em toda superfície de contato, a tradicional equação para definição do atrito em correias pode ser usada conforme indica a EQ. (2.4).

$$\mu = \ln \frac{(F2/F1)}{\theta} \quad (2.4)$$

## 2.6 Esforço combinado de tração e dobramento da tira metálica

Na operação de bobinamento, a tira, após ser presa pelo mordente do mandril, passa por um processo de conformação mecânica, que envolve forças de tração e dobramento. Esta operação pode ser comparada, de forma análoga, ao processo de arraste de uma tira metálica sobre uma superfície curva, conforme mostra a FIG 2.22.

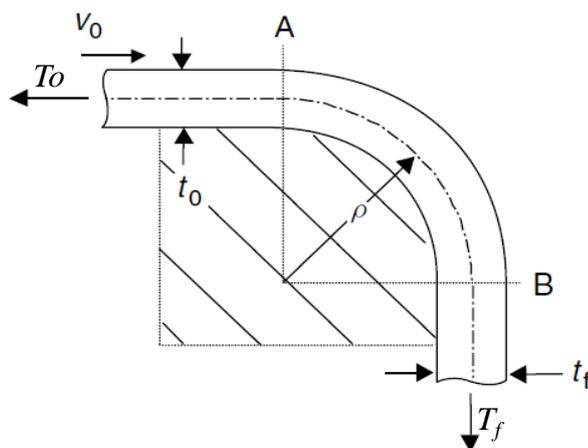


FIGURA 2.22 – Conformação de tira sob tração.  
 FONTE – Marciniak et al, 2002.

Para análise dessa operação, foi desenvolvido um modelo simples, que avalia a combinação de momento e tração sobre a tira, considerando se que a tensão na tira seja menor que a tensão de escoamento do material (Marciniak et al, 2002).

Nesse modelo, a tira é tracionada para o lado direito, e, no ponto 'A', inicia-se o dobramento; então, desliza sob atrito até o ponto 'B', onde é finalizado o dobramento.

A força na tira após o início do dobramento no ponto 'A' ( $T_A$ ) é definida pela expressão indicada na EQ. (2.5).

$$TA = T_0 + \Delta T_0 \quad (2.5)$$

onde  $T_0$  é a tração contrária ao movimento da tira, e  $\Delta T_0$  é a força necessária para dobrar a tira sobre a superfície cilíndrica, que é obtida pela relação indicada na EQ. (2.6).

$$\Delta T_0 = \frac{\sigma_y \cdot t_o \cdot L}{4\eta(\rho / t_o)} \left[ 1 + \left( \frac{T_0}{\sigma_y \cdot t_o \cdot L} \right)^2 \right] \quad (2.6)$$

onde  $t_o$  e  $L$  são, respectivamente, a espessura e largura da tira,  $\eta$  é um fator de eficiência, e  $\rho$  é o raio de curvatura. Mas, como existe atrito no trecho correspondido entre os pontos A e B, a tração final do processo de conformação  $T_f$  é definida pela EQ. (2.7).

$$T_f = TA \cdot \exp\left(\mu \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.7)$$

onde  $\mu$  é o atrito da tira sobre a superfície cilíndrica.

### 3 METODOLOGIA

No processo de definição da metodologia, foram avaliados os projetos dos mordentes dos mandris de três laminadores a frio da ArcelorMittal Inox Brasil. Observou-se uma similaridade entre os projetos no que se refere ao deslocamento das réguas móveis, que é feito através de pequenos pistões hidráulicos, para se fazer o aperto da régua móvel contra a régua fixa; o retorno é feito por molas fixadas na régua móvel. Mas foram observadas diferentes geometrias das réguas dos mordentes na região de contato com a tira. As pressões hidráulicas de atuação dos mordentes, a quantidade de pistões e os diâmetros dos pistões também são diferentes para os três laminadores.

#### 3.1 Aplicação da metodologia em mordentes de mandris

A metodologia é aplicada, inicialmente, em três casos experimentais, envolvendo mordentes dos mandris dos laminadores LB1, LB3 e LB4. A aplicação se processa em três etapas:

- 1ª etapa: Consiste no desenvolvimento e fabricação de modelos físicos próximos da escala real onde possam ser utilizados os próprios segmentos dos mandris dos laminadores equipados com os respectivos mordentes. Nessa fase, é necessário o conhecimento detalhado de cada projeto, a seleção do sistema de medição e um rigoroso planejamento para execução dos testes.
- 2ª etapa: Consiste em submeter o modelo a ensaios de natureza experimental sob diversas condições de operação: testes de tração direta da tira, testes com vários arcos de contato entre a tira e o dispositivo e testes para medição do atrito entre a tira e os segmentos dos mandris.
- 3ª etapa: Identificação de um modelo analítico que melhor represente o sistema técnico em questão, de acordo com o dimensionamento de cada equipamento, com o objetivo de validar os resultados obtidos com os modelos físicos.

Tendo-se em vista a disponibilidade dos segmentos dos mandris, com os mordentes devidamente preparados com réguas novas, os testes com os modelos físicos obedeceram à seguinte ordem: primeiro, o LB1; na sequência, LB4; por último, o LB3.

A FIG. 3.1 apresenta o fluxograma com a sequência de aplicação da metodologia.

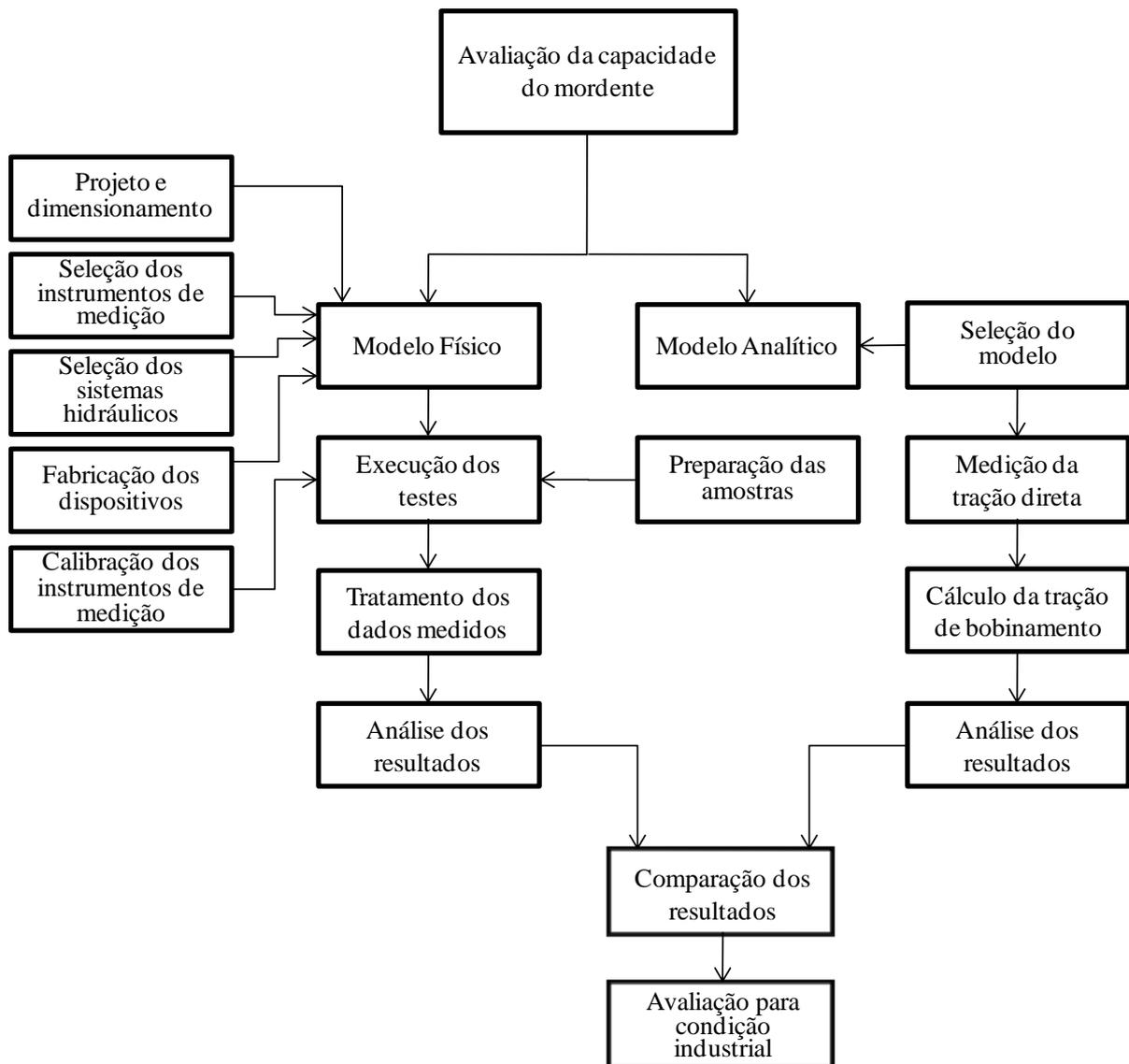


FIGURA 3.1 - Fluxograma com a sequência de aplicação da metodologia.

A aplicação da metodologia no projeto do LB1 foi realizada em duas etapas. A primeira etapa consistiu na avaliação do projeto de mordente original; na sequência, foram realizados novos testes para uma condição denominada projeto alterado, o qual foi obtido empiricamente através do processo de retificação dos dentes da régua fixa, a fim de restabelecer as condições superficiais dos dentes.

A metodologia não foi aplicada por completo no projeto do LB3, em função da não conformidade identificada na régua móvel. Com a inversão dos dentes da régua, houve uma redução considerável da capacidade do mordente, além da danificação da superfície de

contato com a tira após realização dos primeiros testes.

Além dos três casos experimentais, a metodologia foi aplicada para uma condição industrial, com o objetivo de validar a aplicação da metodologia. Neste caso, o mandril do LB1 foi submetido à tração de bobinamento com o enrolamento de apenas  $\frac{3}{4}$  de volta da tira no mesmo.

### 3.2 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 a frio da ArcelorMittal Inox Brasil, 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 50 kN, para medir a tração na tira;
- Cilindro hidráulico com diâmetro de camisa de 0,140 m, diâmetro da haste de 0,085 m e curso de 0,085 m, 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;
- Sistema de aquisição capaz de registrar e analisar os dados coletados.

O dispositivo apresentado na FIG. 3.2 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 FIG. 3.2. 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.

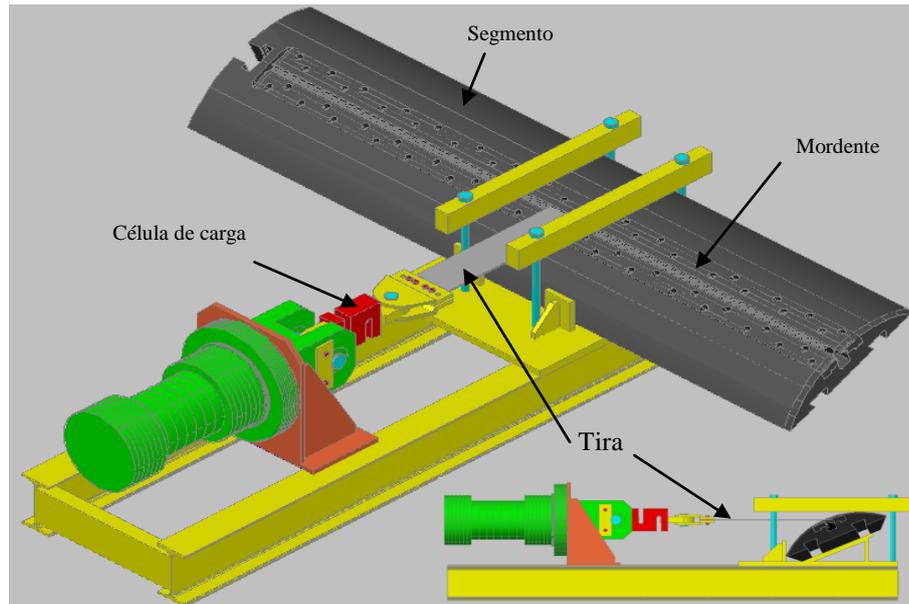


FIGURA 3.2 - Dispositivo para medição de tração direta.

O outro dispositivo, mostrado na FIG. 3.3, 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 m). Nesta luva de aço estrutural, é preso o segmento que contém o mordente, completando o perfil cilíndrico, conforme mostra a FIG. 3.4. Com esse dispositivo, é possível avaliar a influência do arco de contato, do atrito e da flexão da tira na capacidade de bobinamento.

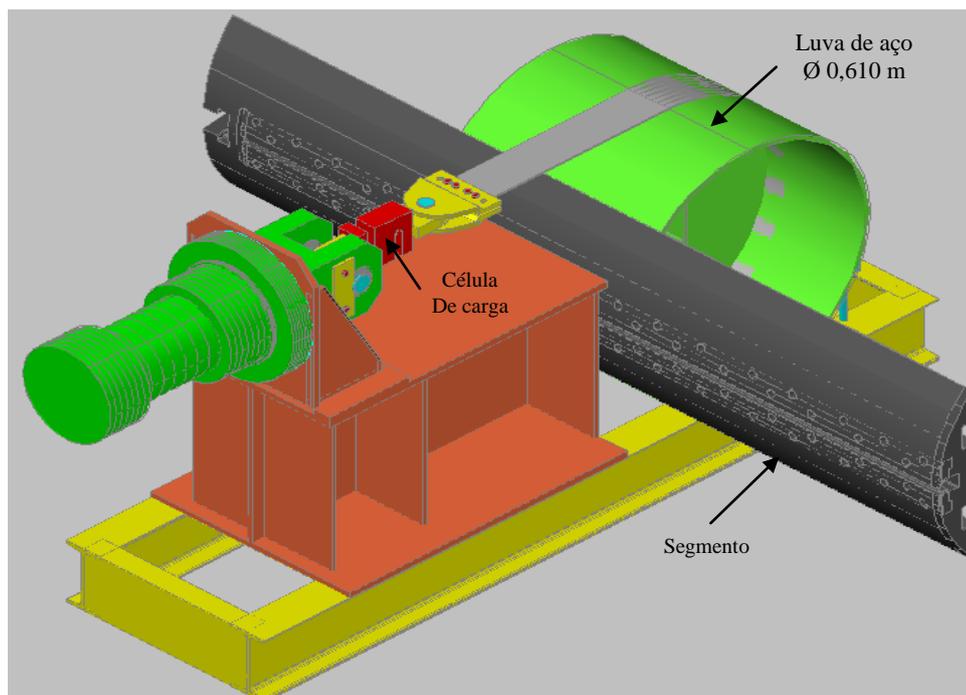


FIGURA 3.3 - Dispositivo para medição de tração com arco de contato.

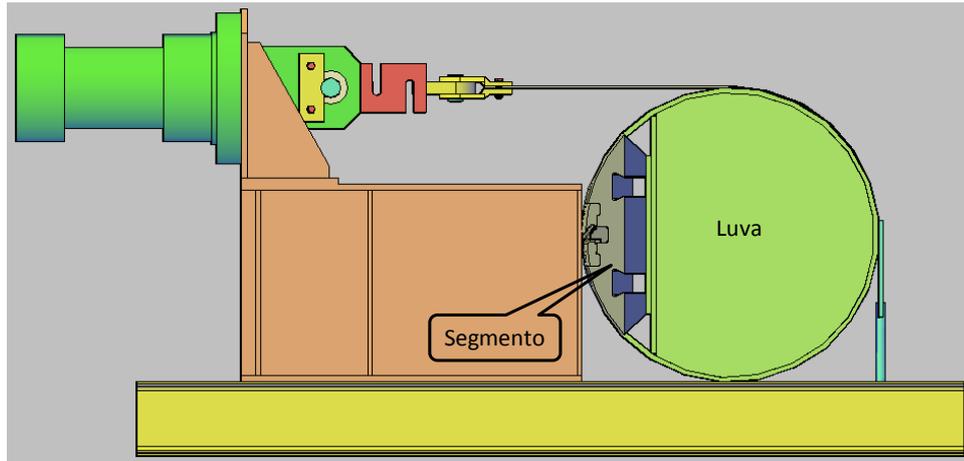


FIGURA 3.4 – Vista lateral do dispositivo de medição de tração com arco de contato.

Para os dois dispositivos, utilizou-se uma unidade hidráulica para alimentação dos pistões do mordente com pressão máxima de 25 MPa e vazão de  $8,33 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  e outra para alimentação do cilindro hidráulico responsável pela aplicação da tração na tira, dimensionada para pressão máxima de 10 MPa e vazão de  $3,67 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . Essas unidades foram equipadas com transdutores de pressão devidamente calibrados, de forma que os sinais possam ser registrados no sistema de aquisição de dados IbaAnaliser<sup>®</sup>. Foi montado um circuito hidráulico com válvula redutora de pressão proporcional para alimentação do cilindro de tração e utilizada uma unidade eletrônica para alimentar a mesma.

A célula de carga de capacidade de 50 kN foi escolhida tendo-se em vista a máxima tensão específica sobre a tira utilizada nos processos de laminação de 180 MPa e por fornecer medição direta de força. Ligado a esse componente, há um indicador para fornecer os valores de força medidos durante os testes.

Esses dispositivos representam um sistema para investigar a capacidade dos mordentes de mandris de laminadores a frio em função do arco de contato entre a tira e o mandril, bem como medir o atrito na interface tira/mandril.

### 3.3 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 com acabamento II (bobina laminada a quente, recozida, decapada mecânica e quimicamente), com espessura de  $2,85 \times 10^{-3} \text{ m}$  e largura de 0,100 m. Esse aço foi escolhido tendo-se em vista sua elevada resistência mecânica, comparada com os aços inoxidáveis da

série 4xx e por ser material cujo processo de laminação exige elevada força de tração de bobinamento.

Para o dispositivo de tração direta, utilizaram-se tiras com comprimento de 0,410 m para testes no mordente do LB1 e com 0,340 m para testes nos mordentes do LB3 e LB4. As tiras utilizadas no dispositivo de tração com arco de contato foram cortadas com comprimentos variados, que foram definidos em função do arco formado entre a tira e a luva de aço, variando entre 0,440 m e 2,10 m.

A TAB. 3.1 apresenta a composição química do material; na TAB. 3.2, encontram-se as propriedades mecânicas, cujo registro se encontra no anexo A.

TABELA 3.1  
Composição química do aço inoxidável austenítico – AISI 304.

Composição Química (% peso)							
C	Mn	P	Si	Ni	Cr	S	Co
0,04	1,20	0,03	0,37	8,01	18,23	0,03	0,16

Fonte – Laboratório de análise química da ArcelorMittal Inox Brasil.

TABELA 3.2  
Propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico – AISI 304.

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

Fonte – Laboratório de ensaios mecânicos da ArcelorMittal Inox Brasil.

As tiras foram cortadas através de processo a frio em uma tesoura de corte transversal, na mesma direção da laminação da bobina, e foram conferidas quanto à espessura, largura, dureza e rugosidade. Todas as tiras tiveram uma das extremidades furadas, a fim de se permitir a fixação na garra que é acoplada à célula de carga e que, por sua vez, está ligada ao cilindro hidráulico aplicador de força de tração.

### 3.4 Avaliação da capacidade dos mordentes

Na operação de bobinamento, a tira é submetida a diferentes tipos de deformação antes que seja iniciado o processo de laminação. Inicialmente, a tira é presa no mordente e sofre esforços de compressão e flexão. A partir da saída do mordente, passa a ser submetida a

uma combinação de esforços de tração e flexão, até a sua completa conformação sobre a superfície do mandril.

Os mordentes dos mandris do LB1, LB4 e LB3 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 FIG. 3.5.

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:  $\theta = 0$  rad.,  $\theta = \pi/2$  rad.,  $\theta = \pi$  rad.,  $\theta = 3\pi/2$  rad. e  $\theta = 7\pi/4$  rad., como mostrado na FIG. 3.6. O ângulo de  $\theta = 0$  rad. representa a tira conformada apenas na saída do mordente, como ilustra a FIG. 3.7. Essa posição foi escolhida tendo-se em vista verificar a contribuição do dobramento da tira sobre a régua guia na tração de bobinamento.

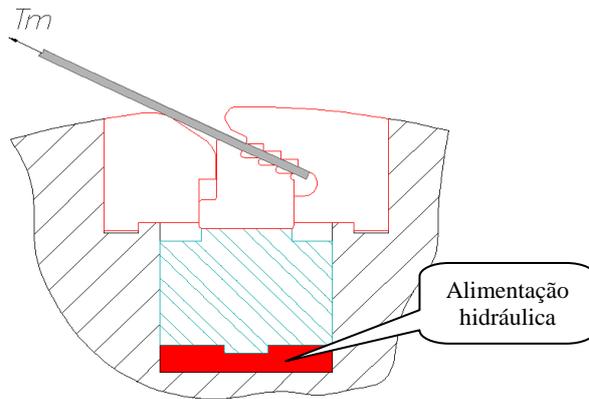


FIGURA 3.5 - Detalhe da aplicação de tração direta na tira.

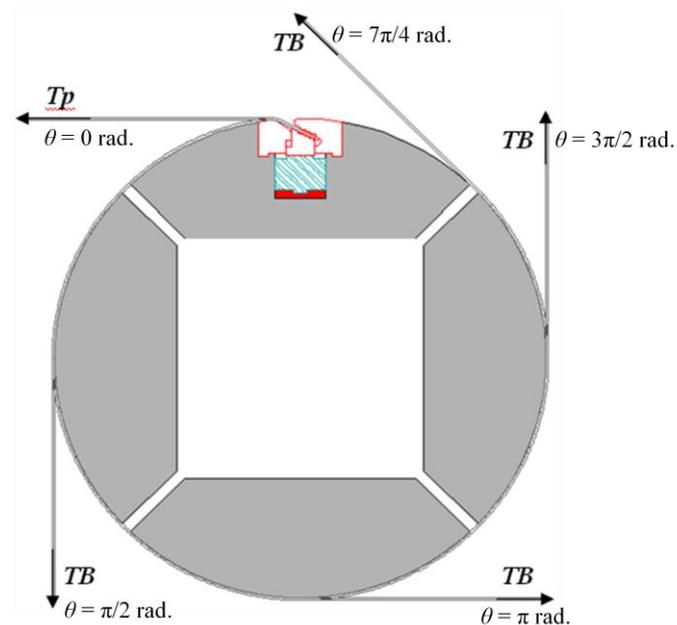


FIGURA 3.6 - Tração na tira com arco de contato.

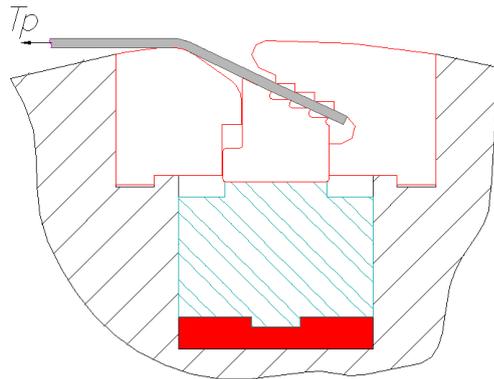


FIGURA 3.7 - Detalhe de aplicação de tração na tira com  $\theta = 0$  rad.

### 3.4.1 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. (3.1).

$$F_M = \frac{(n.P.A_p.) - F_r}{C} \quad (3.1)$$

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. A área  $A_p$  é função do diâmetro do pistão  $d$ , como indica a EQ. (3.2).

$$A_p = \frac{\pi.d^2}{4} \quad (3.2)$$

Nesse modelo, a força ( $T_m$ ), indicada na FIG. 3.5, foi obtida através de medições realizadas no dispositivo de tração direta.

Uma vez que o processo de bobinamento envolve dupla conformação da tira, uma na saída do mordente e outra sobre o mandril, a EQ. (2.7) pode ser adaptada para a saída do mordente, conforme indicado na EQ. (3.3).

$$Tp = (Tm + \Delta Tm) \cdot \exp(\mu\varphi) \quad (3.3)$$

onde  $Tp$  é a tração com  $\theta = 0$  rad., denominada tração plana (ver FIG. 3.7),  $\varphi$  é o arco de contato da tira com a régua guia e  $\Delta Tm$  é a força de dobramento da tira sobre o raio  $r$  da régua guia, que é obtida pela expressão indicada na EQ. (3.4).

$$\Delta Tm = \frac{\sigma_y \cdot Tm \cdot L}{4\eta(r/t_o)} \left[ 1 + \left( \frac{Tm}{\sigma_y \cdot t_o \cdot L} \right)^2 \right] \quad (3.4)$$

Logo, a tração de bobinamento ( $TB$ ) pode ser expressa pela EQ. (3.5).

$$TB = (Tp + \Delta Tp) \cdot \exp(\mu\theta) \quad (3.5)$$

onde  $\theta$  é o arco de contato da tira sobre o mandril e  $\Delta Tp$  é a força necessária para dobrar a tira sobre a superfície do mandril de raio  $R$ , conforme indicado na EQ. (3.6).

$$\Delta Tp = \frac{\sigma_y \cdot Tp \cdot L}{4\eta(R/t_o)} \left[ 1 + \left( \frac{Tp}{\sigma_y \cdot t_o \cdot L} \right)^2 \right] \quad (3.6)$$

### 3.4.2 Execução dos testes de tração direta

A aplicação da metodologia para 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 0,050 m, 0,100 m e 0,150 m. 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 FIG. 3.8 e detalhe da FIG. 3.9. O segmento foi fixado à estrutura do dispositivo por travessas e tirantes.

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.

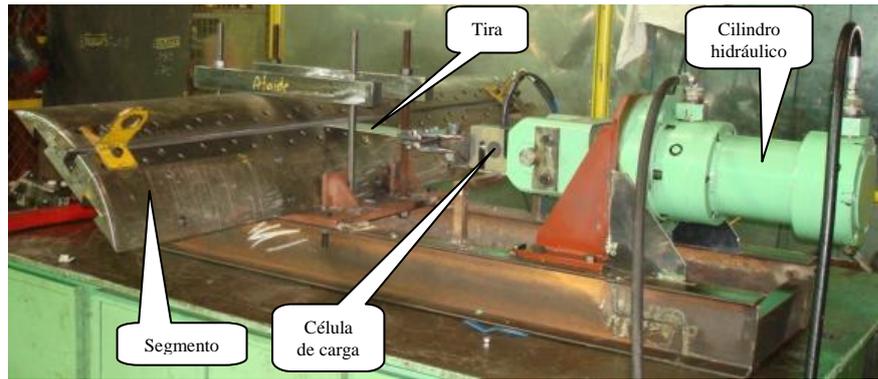


FIGURA 3.8 - Montagem do dispositivo de tração direta.

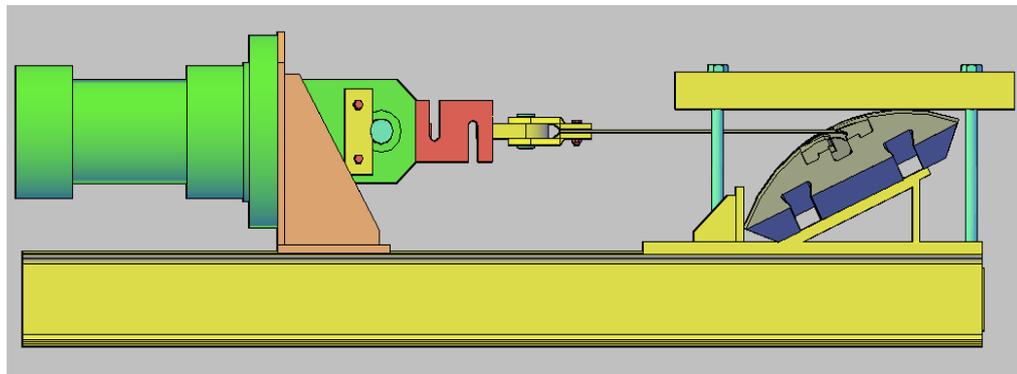


FIGURA 3.9 - Detalhe do posicionamento do segmento e da tira.

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. (3.7).

$$F_r = n.P_m.A_p \quad (3.7)$$

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. (3.8).

$$P = \frac{F_M.L}{A_p.n} + P_m \quad (3.8)$$

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

Realizou-se a montagem do sensor ultrassônico, conforme mostrado na FIG. 3.10

e feita calibração dentro da faixa de todo o curso do cilindro hidráulico.



FIGURA 3.10 - Montagem do sensor ultrassônico.

A unidade hidráulica de alimentação do cilindro de tração foi ajustada para pressão máxima de 10 MPa 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. A FIG. 3.11 apresenta a unidade eletrônica utilizada.



FIGURA 3.11 - Unidade eletrônica para rampa de força.

Durante os testes, foram coletados simultaneamente o valor da pressão hidráulica de alimentação do cilindro de tração, a força medida pela célula de carga e o deslocamento da tira. Estas variáveis foram registradas pelo sistema de aquisição de dados IbaAnaliser<sup>®</sup> e analisadas através do software Excel<sup>®</sup>. Outros dados foram registrados manualmente, tais como: data, hora, comprimento e largura da tira, dureza, rugosidade do segmento e da tira e pressão hidráulica de atuação do mordente. O anexo B apresenta os dados coletados.

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

Uma vez conhecido o comportamento da força de tração máxima para os três projetos, definido em função das três larguras de tiras testadas, realizou-se o restante dos testes com tiras de 0,100 m de largura.

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

A fim de se facilitar o entendimento dos testes com arco de contato, a FIG. 3.12 apresenta a correlação entre grau e radiano.

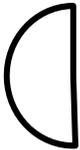
				
Grau	90	180	270	315
Radiano	$\pi/2$	$\pi$	$3\pi/2$	$7\pi/4$

FIGURA 3.12 - Correlação de medidas de 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 FIG. 3.13 mostra a montagem do dispositivo; a FIG. 3.14, o detalhe do posicionamento do segmento preparado para um teste com arco de contato de  $\theta = 3\pi/2$  rad. Para evitar a compressão da tira entre a luva de aço e o suporte do cilindro, foi prevista uma abertura de 0,150 m de largura no centro do suporte do cilindro.

Como nos testes com o dispositivo de tração direta, a cada teste foram realizados os procedimentos de limpeza nas tiras, segmento e luva de aço.



FIGURA 3.13 - Dispositivo para medição de tração com arco de contato.

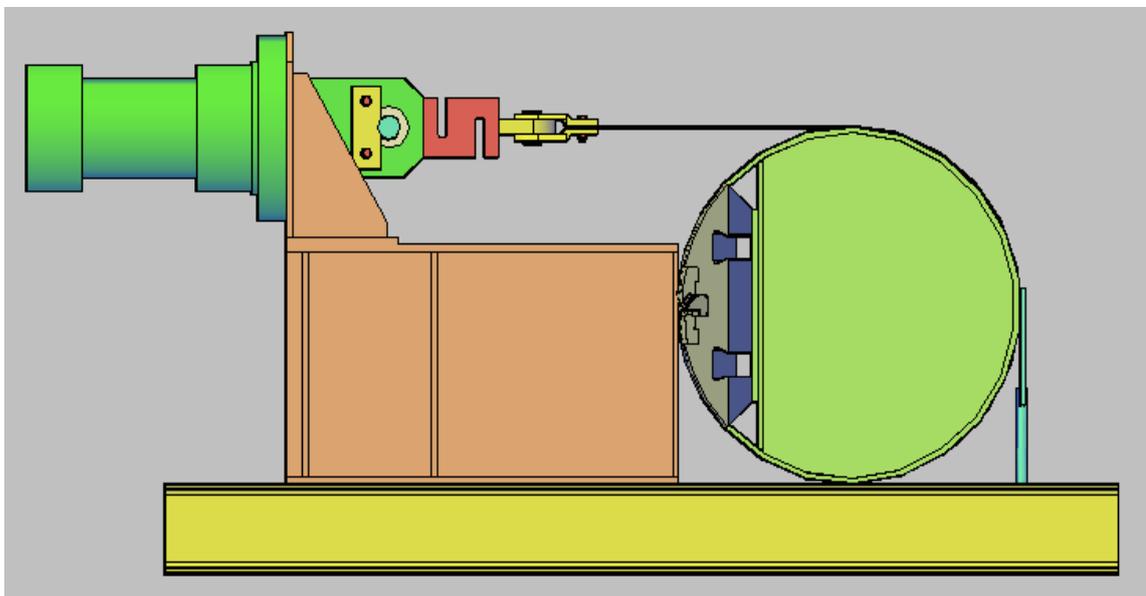


FIGURA 3.14 – Ilustração de um teste com arco de contato de  $\theta = 3\pi/2$  rad.

Além dos dados registrados e gravados, foram coletados manualmente: data, hora, comprimento e largura da tira, dureza, rugosidade do segmento e da tira, pressão hidráulica de atuação do mordente, arco de contato e rugosidade da luva de aço. O anexo C apresenta os dados coletados.

### 3.5 Medição do Atrito

O atrito na interface entre a tira e o mandril tem considerável importância nas operações de bobinamento de chapas metálicas. O atrito ocorre na região do mordente, onde a tira é presa, e na região conformada ao longo do mandril; logo, tem uma contribuição relevante para a força total de bobinamento. Neste trabalho, utilizou-se uma metodologia para determinação do atrito médio entre a tira e o mandril, através de medição indireta.

A medição do atrito pretende simular o deslizamento da tira sobre os segmentos dos mandris. O método escolhido foi baseado na American Society for Testing and Materials - ASTM G143 (2009), que define um sistema similar ao dispositivo desenvolvido para medição da capacidade do mordente com arco de contato. A diferença entre os dois sistemas está nos atuadores de aplicação de tração na tira. A American Society for Testing and Materials - ASTM G143 (2009) prevê um motor linear, com transmissão por fuso de esfera; o dispositivo desenvolvido para este estudo utiliza um cilindro hidráulico de dupla ação.

Os segmentos dos mandris do LB1 e LB4 foram fixados na luva de aço e posicionados conforme mostra a FIG. 3.15, fazendo um ângulo de  $45^\circ$  com a horizontal, de forma que a tira tenha contato apenas com o segmento.

Foram utilizadas tiras do aço AISI 304 com  $2,85E-3$  m de espessura, 0,100 m de largura e 1,40 m de comprimento, cortadas na mesma direção da laminação da chapa. Uma extremidade da tira foi fixada à célula de carga, conforme mostrado na FIG. 3.16, e a outra foi interligada a um peso padrão de 10 kN.

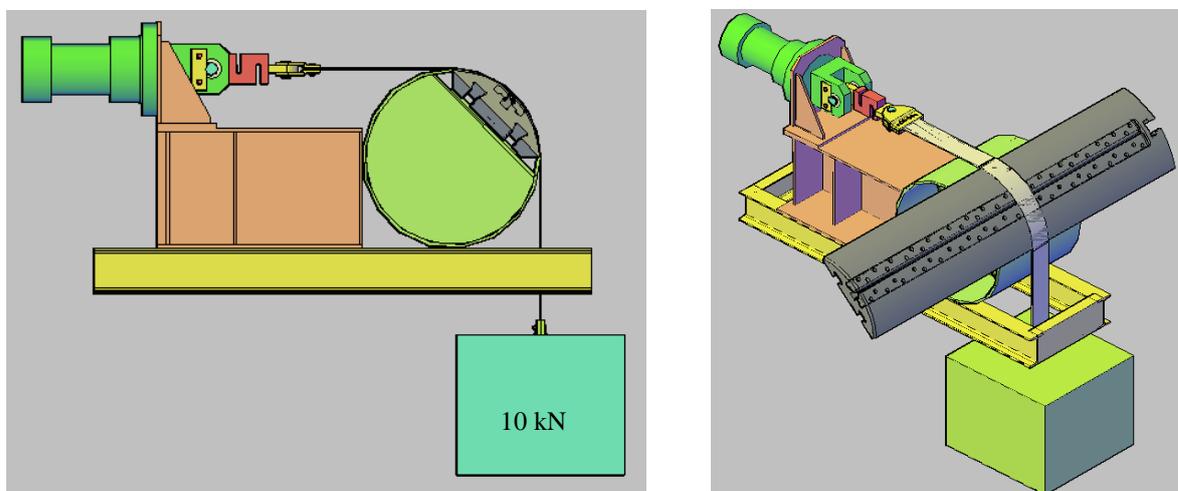


FIGURA 3.15 - Arranjo do dispositivo de tração com arco de contato para medição de atrito.

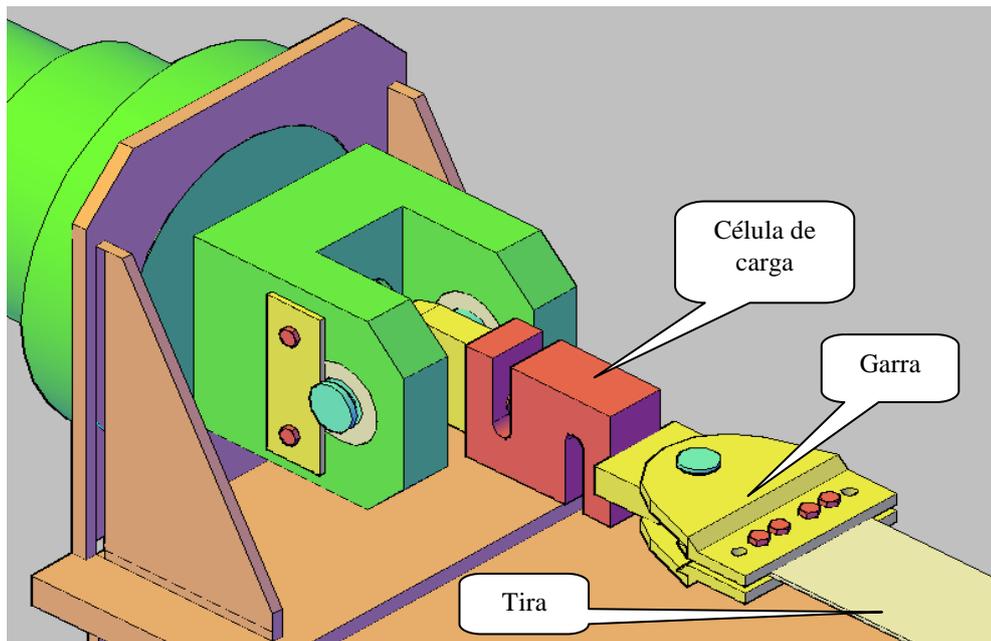


FIGURA 3.16 - Detalhe da fixação da tira à célula de carga.

Tendo-se em vista assegurar a confiabilidade da medição, a célula de carga foi calibrada utilizando-se pesos padrão. Foram içados três pesos conhecidos com a célula de carga na posição vertical e ajustado o indicador de força.

Não há uma distância mínima de deslizamento da tira sobre a superfície cilíndrica, que, neste caso, é o próprio segmento do mandril. Se o objetivo for apenas o atrito estático basta sair da velocidade zero, deslocar poucos milímetros e, se for o atrito cinético, a distância deve ser suficiente para que a força aplicada pelo atuador permaneça constante (ASTM G143, 2009).

### 3.5.1 Procedimento de medição do atrito

Os testes foram executados nas condições a seco, lubrificado com óleo mineral utilizado para refrigeração da chapa durante o processo de laminação e lubrificado com a mistura do mesmo óleo mineral com graxa à base de lítio e dissulfeto de molibdênio, que é utilizada na lubrificação dos mandris. O óleo mineral utilizado possui viscosidade de 8 cst a 40°C e densidade de 860 kg/m<sup>3</sup>. Foi realizada limpeza no segmento e nas tiras de aço com Thinner 3500, para remoção de oleosidade e resíduos.

Foram medidas as rugosidades dos segmentos e das tiras de aço AISI 304, cujos valores estão registrados na TAB. 3.3.

TABELA 3.3

Valores médios de rugosidades medidas nos segmentos e tiras metálicas.

Segmento do LB1	Segmento do LB4	Tiras metálicas
2,1 $R_a$	1,6 $R_a$	3,0 $R_a$

Uma extremidade da tira foi interligada ao dispositivo, e a outra ao peso tensionador, de forma alinhada, seguindo-se as marcações feitas no segmento.

Foi ajustada a velocidade média do cilindro de tração em 0,007 m/s, feito um pequeno deslocamento, apenas o suficiente para retirar o peso do solo; aguardado o tempo de 60 s para estabilização da carga, na sequência foi realizado o deslocamento referente ao curso restante do cilindro hidráulico de 0,070 m. Nessa operação, foram registrados e gravados os sinais de força sobre a tira e o seu deslocamento.

Conforme modelo desenvolvido por Saha et al. (1996) e de posse do valor do peso tensionador ( $F1$ ), da força medida pela célula de carga ( $F2$ ), do arco de contato ( $\theta$ ), que é de  $\pi/2$  rad. e levando-se em conta a força de flexão da tira sobre o segmento ( $Fb$ ), foi calculado o atrito médio ( $\mu$ ) através da EQ. (2.2). A dedução desta equação se encontra no anexo D.

Para cada teste replicado, foi utilizada uma nova tira metálica e realizados os mesmos procedimentos de limpeza. Foram três testes para cada condição: a seco, lubrificado com óleo e lubrificado com óleo e graxa.

A FIG. 3.17 apresenta o detalhe da tira conformada sobre o segmento, e a FIG. 3.18 mostra o conjunto montado que foi utilizado para avaliação do atrito da tira com o segmento, onde se destaca o peso utilizado para tensionamento da tira.



FIGURA 3.17 - Detalhe da tira conformada sobre o segmento.



FIGURA 3.18 - Conjunto montado para avaliação do atrito.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados da medição do atrito entre a tira e segmento do mandril; na sequência, apresentam-se os resultados da tração de bobinamento obtidos nos modelos analítico e físico, com destaque para a máxima tração de bobinamento de cada projeto, em função do arco de contato. Em seguida, apresenta-se a análise dos resultados obtidos nos três casos experimentais; finalmente, é feita uma análise de viabilidade da aplicação da metodologia para uma condição industrial.

### 4.1 Resultados da medição do atrito entre a tira e o segmento do LB1

Tendo-se em vista o cálculo da tração de bobinamento em função do arco de contato formado entre a tira e o mandril, foi necessário conhecer o atrito médio na interface tira e segmento do mandril. Para isso, foi utilizado o mesmo dispositivo de medição de tração com arco de contato, mas com uma alteração no circuito hidráulico: utilizou-se válvula convencional, sem rampa de força.

O método de medição indireta utilizado apresentou resultados consistentes e boa repetibilidade. O GRA. 4.1 apresenta os resultados de três testes realizados na condição a seco, com deslizamento da tira sobre o segmento do mandril do LB1. Observa-se boa similaridade dos resultados.

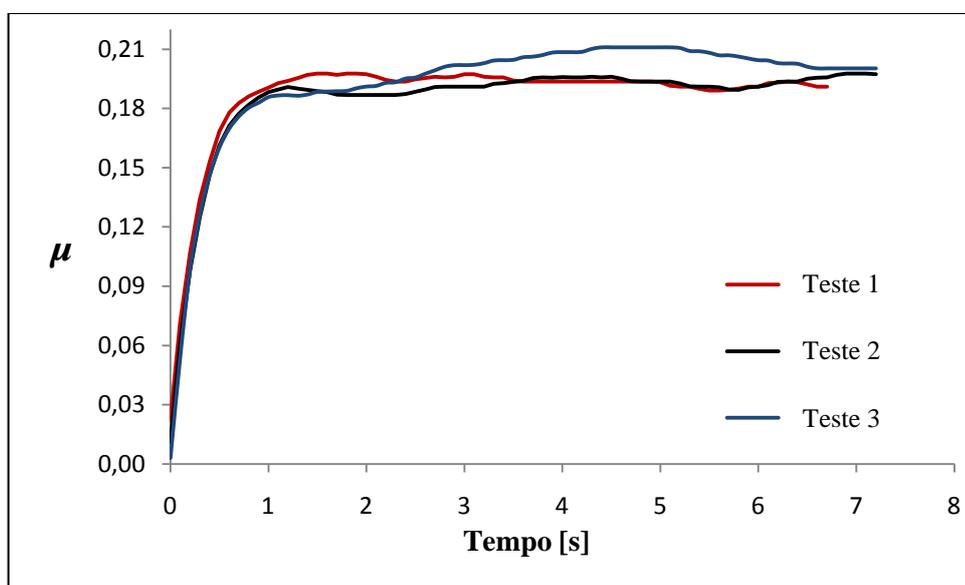


GRÁFICO 4.1- Repetibilidade na medição do atrito a seco entre tira e segmento do LB1.

Realizaram-se novos testes para três condições de lubrificação: a seco, lubrificado com óleo mineral utilizado no processo de laminação e lubrificado com a mistura de óleo e graxa utilizada na lubrificação dos mandris. Os testes apresentaram diferentes resultados, em função da condição de lubrificação. O GRA. 4.2 apresenta os valores de atrito para três condições.

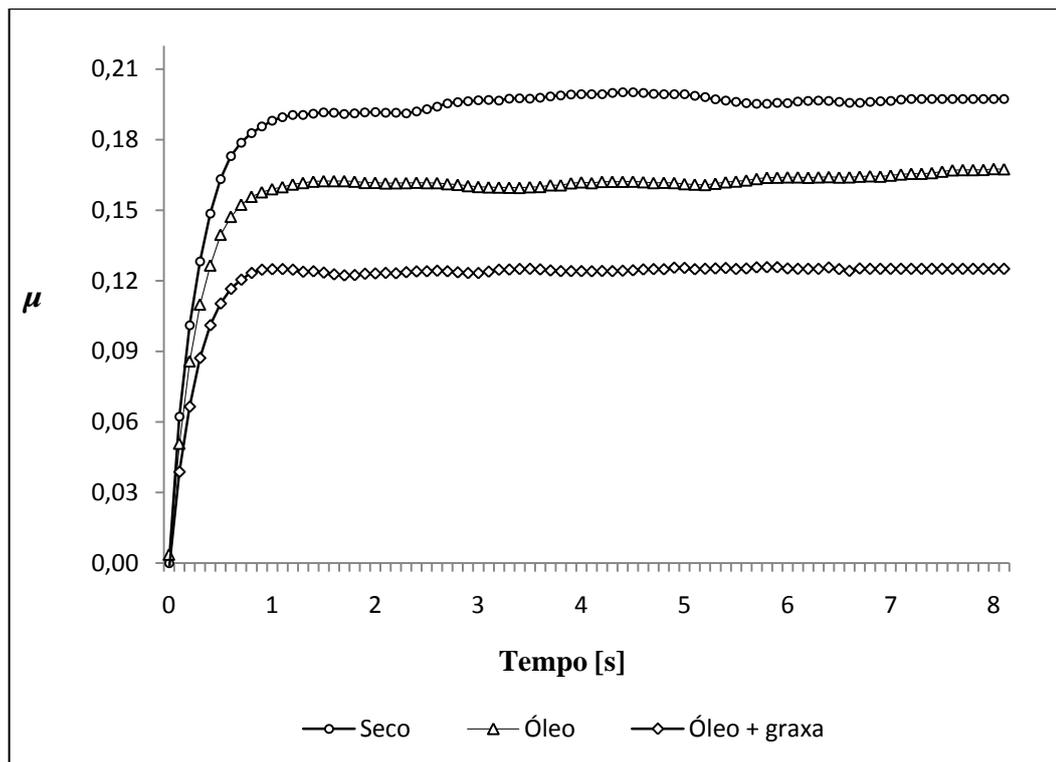


GRÁFICO 4.2- Influência da lubrificação no atrito tira/segmento do LB1.

Observa-se, no GRA. 4.2, uma diferença significativa do atrito na condição de lubrificação com óleo e graxa, situação muito comum no processo industrial, e da condição a seco.

## 4.2 Resultados do modelo analítico para o mordente original do LB1

### 4.2.1 Cálculo da força de tração de bobinamento – projeto original

Com relação à força de mordedura aplicada sobre a tira, foram inicialmente avaliados os três projetos para definição de um valor que pudesse ser usado em todos os testes. O projeto do LB1 foi o escolhido, porque é o que apresenta a menor área de pistões e a

menor pressão hidráulica para alimentação do mordente; logo, menor força disponível.

Nesse caso, a força de mordedura ( $F_M$ ) distribuída sobre o comprimento da régua móvel foi determinada através dos seguintes dados:

- Pressão hidráulica ( $P$ ) de 10 Mpa disponível no LB1;
- Número de pistões ( $n$ ) igual a 4;
- Área do pistão ( $A_p$ ) de  $3,17E-3 \text{ m}^2$ ;
- Força resistente ( $F_r$ ) calculada pela EQ. (3.7) de 570 N;
- Comprimento ( $C$ ) da régua móvel de 0,800 m.

A força de mordedura ( $F_M$ ) calculada foi de 147 kN/m, valor utilizado para todos os experimentos realizados. Com base nesse valor, determinaram-se as pressões hidráulicas de atuação do mordente, utilizando-se a EQ. (3.8).

Em seguida, foi feita a medição da tração do mordente no dispositivo de medição de tração direta, utilizando-se uma tira de 0,100 m de largura. O valor encontrado foi de  $T_m = 9133 \text{ N}$ .

A tração de bobinamento ( $TB$ ) foi calculada para tira com 0,100 m de largura, com base na tração direta medida ( $T_m$ ), no atrito ( $\mu$ ) medido na interface tira e segmento (a seco), no arco de contato ( $\theta$ ) entre a tira e o mandril, no arco de contato ( $\varphi$ ) da tira com o raio externo da régua guia e das componentes de flexão da tira sobre a régua guia ( $\Delta Tm$ ) e da tira sobre o mandril ( $\Delta Tp$ ). A TAB. 4.1 apresenta os valores para tração de bobinamento; o GRA. 4.3, a curva em função do arco de contato.

TABELA 4.1

Resultado do modelo analítico para tração de bobinamento referente ao projeto original do LB1.

Projeto	$L$ [m]	$t_o$ [m]	$\sigma_y$ [MPa]	$r$ [m]	$R$ [m]	$\varphi$ [rad]	$\theta$ [rad]	$\mu$	$T_m$ [N]	$\Delta Tm$ [N]	$T_p$ [N]	$\Delta Tp$ [N]	$TB$ [N]
LB1	0,100	2,85E-3	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	0	0,17	9133	7312	18244	304	18549
LB1	0,100	2,85E-3	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$\pi/2$	0,17	9133	7312	18244	304	24226
LB1	0,100	2,85E-3	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$\pi$	0,17	9133	7312	18244	304	31642
LB1	0,100	2,85E-3	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$3\pi/2$	0,17	9133	7312	18244	304	41327
LB1	0,100	2,85E-3	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$7\pi/4$	0,17	9133	7312	18244	304	47230

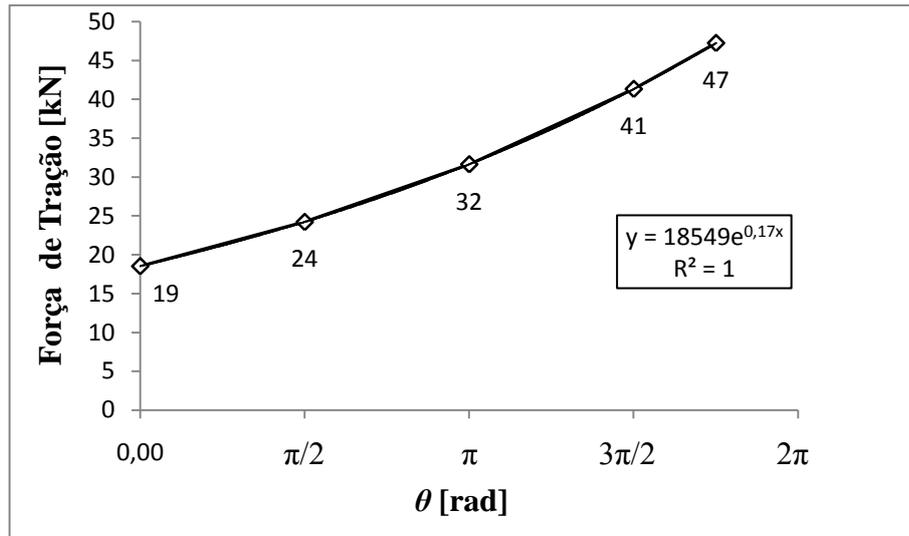


GRÁFICO 4.3 - Tração de bobinamento calculada para o projeto original do LB1.

### 4.3 Resultados do modelo físico para o mordente original do LB1

#### 4.3.1 Medição da força de tração direta – projeto original

Os primeiros testes realizados com o dispositivo de tração direta tiveram como objetivo avaliar o comportamento da máxima força de tração aplicada em função da largura da tira. Para isso, foram utilizadas tiras com larguras de 0,050 m, 0,100 m e 0,150 m.

Inicialmente, foi medida a pressão hidráulica ( $P_m$ ) necessária para vencer a força de mola ( $F_m$ ) e a força de atrito ( $F_a$ ). Em seguida, definiram-se as pressões de alimentação do mordente para cada largura de tira, utilizando-se a EQ. (3.8) e os dados relacionados abaixo:

- Força de mordedura ( $F_M$ ) de 147 kN/m;
- Largura da tira ( $L$ );
- Número de pistões ( $n$ ) igual a 4;
- Área do pistão ( $A_p$ ) de  $3,17E-3 \text{ m}^2$ .

A TAB. 4.2 apresenta os valores de pressão utilizados para cada largura de tira testada.

TABELA 4.2  
Pressão de alimentação do mordente do LB1.

Largura	Pressão de alimentação do mordente ( $P_m$ )
0,050 m	1,05 MPa
0,100 m	1,65 MPa
0,150 m	2,30 MPa

A tira foi introduzida no mordente, conforme mostra a FIG. 4.1, e a outra extremidade foi conectada à célula de carga. Após aplicação de pressão hidráulica para acionar o mordente, realizou-se um pequeno deslocamento do cilindro de tração, de forma a se eliminarem as folgas de montagem. Na sequência, foi zerado o indicador de força e acionado o cilindro de tração até a tira se desvincular completamente das régua do mordente. Os valores de tração e deslocamento da tira foram coletados e analisados através do programa IbaAnalyzer®.

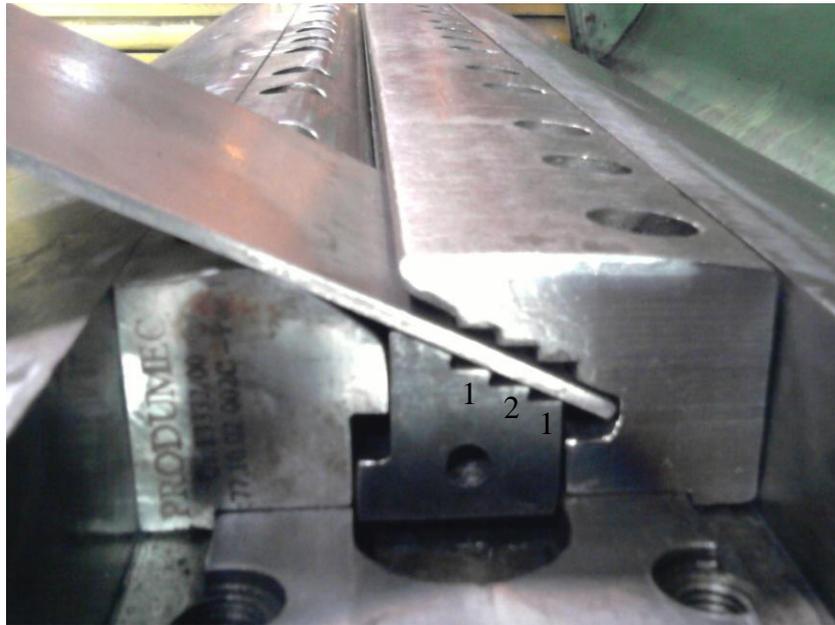


FIGURA 4.1 – Ilustração da tira presa no mordente do LB1.

Os GRA. 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam resultados da medição de tração nas tiras de 0,050 m, 0,100 m e 0,150 m.

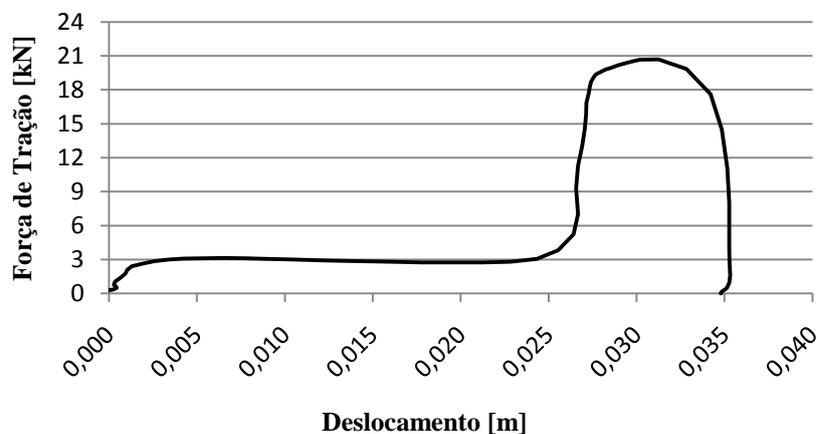


GRÁFICO 4.4- Tração em tira de 0,050 m medida no mordente do LB1.

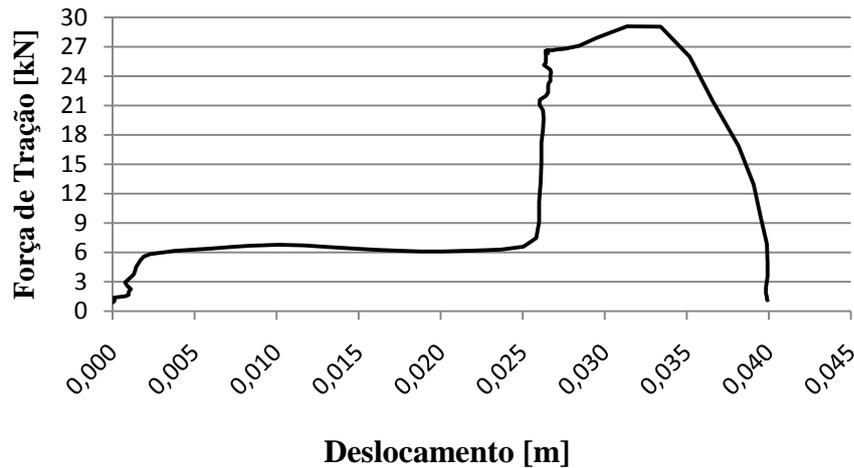


GRÁFICO 4.5- Tração em tira de 0,100 m medida no mordente do LB1.

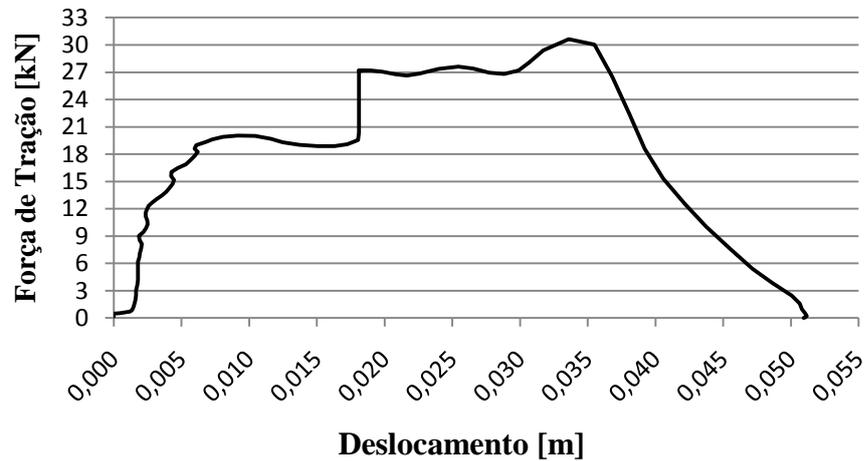


GRÁFICO 4.6- Tração em tira de 0,150 m medida no mordente do LB1.

Observa-se, nos GRA. 4.4, 4.5 e 4.6, que as tiras de 0,050 m e 0,100 m deslizaram por uma distância aproximada de 0,025 m, com baixa tração; na sequência, houve um incremento de força que, possivelmente, foi provocado por uma descamação da tira, o que gerou um emperramento. Este mesmo fato ocorreu na tira de 0,150 m na região compreendida entre 0,015 m e 0,020 m de deslocamento. Segundo Budinski (1992), descamação é caracterizada pelo acúmulo de material microscópico transferido durante o deslizamento da tira, e emperramento (parada na movimentação) é o resultado do processo.

Em função desse deslizamento inicial da tira, consideraram-se, neste trabalho, os valores de tração situados nessa região, ou seja, anterior ao emperramento. O GRA. 4.7 apresenta os valores médios de tração em função da largura da tira, bem como a curva de tendência, com a respectiva equação.

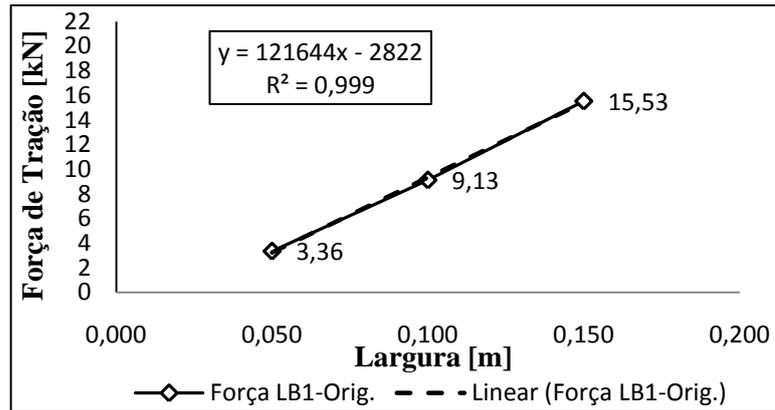


GRÁFICO 4.7- Tração x largura medida no mordente original do LB1.

Observa-se, no GRA. 4.7, que o valor de  $R^2$  indica uma excelente linearidade entre os pontos. Os valores indicados no GRA. 4.7 são as médias dos valores obtidos nos três testes realizados para cada largura de tira; logo, podem apresentar diferenças, quando comparados com os valores indicados nos GRA. 4.4, 4.5 e 4.6, que apresentam resultados individuais.

#### 4.3.2 Medição da força de tração com variação do arco de contato – projeto original

As medições realizadas no dispositivo de tração com arco de contato da tira com a luva de aço objetivaram avaliar a influência do atrito e do arco de contato no valor da máxima tração de bobinamento da tira.

Inicialmente, foram medidas as rugosidades dos materiais envolvidos no processo, como mostra a TAB. 4.3.

TABELA 4.3  
Rugosidades medidas no segmento do LB1, tiras e luva de aço.

Segmento do LB1	Tiras metálicas	Luva de aço
2,1 $R_a$	3,0 $R_a$	2,0 $R_a$

Os testes foram realizados com tiras de 0,100 m de largura para os seguintes arcos de contato:  $\theta = \pi$  rad.,  $\theta = \pi/2$  rad.,  $\theta = \pi$  rad.,  $\theta = 3\pi/2$  rad. e  $\theta = 7\pi/4$  rad. Definiu-se o arco de contato de  $\theta = 0$  rad. como sendo a tira conformada apenas na saída do mordente, a fim de se avaliar o efeito do dobramento da tira sobre a régua guia, na tração de bobinamento.

Após a introdução de uma extremidade da tira no mordente e aplicação de força hidráulica, a tira foi parcialmente conformada sobre a luva de aço, e a outra extremidade foi conectada à célula de carga. Em seguida, o cilindro de tração foi acionado o suficiente para

acomodar a tira sobre a luva de aço, o que gerou uma força de pré-carga entre 1,8 kN a 2.3 kN. Na sequência, foi acionado o cilindro em definitivo até a tira se desprender do mordente.

Ao final de cada teste, foram realizados os procedimentos de limpeza das réguas do mordente, da tira e da luva de aço.

Os GRA. 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam os valores de tração para todos os arcos de contato definidos na metodologia.

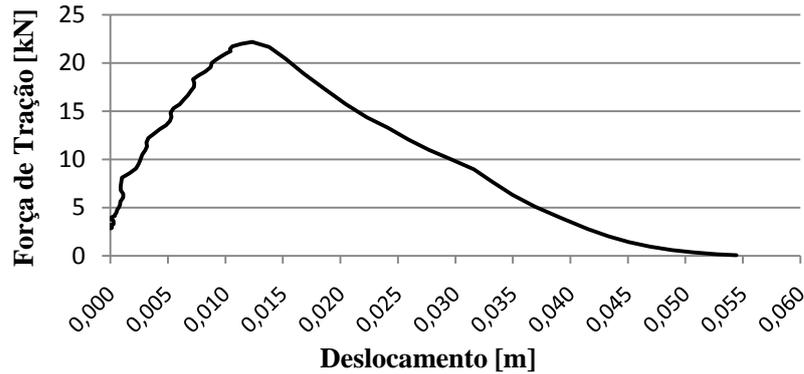


GRÁFICO 4.8 - Tração de bobinamento sem arco de contato no mordente do LB1.

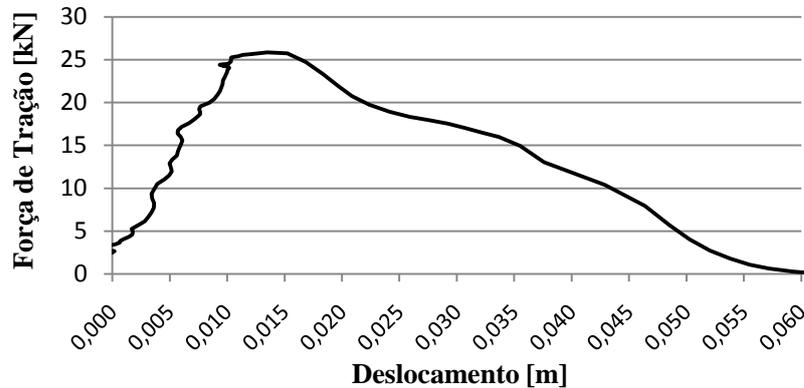


GRÁFICO 4.9 - Tração de bobinamento com  $\theta = \pi/2$  rad. no mordente do LB1.

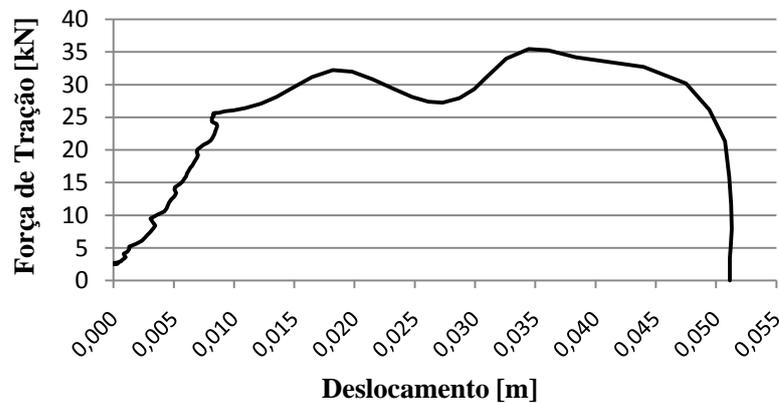


GRÁFICO 4.10 - Tração de bobinamento com  $\theta = \pi$  rad. no mordente do LB1.

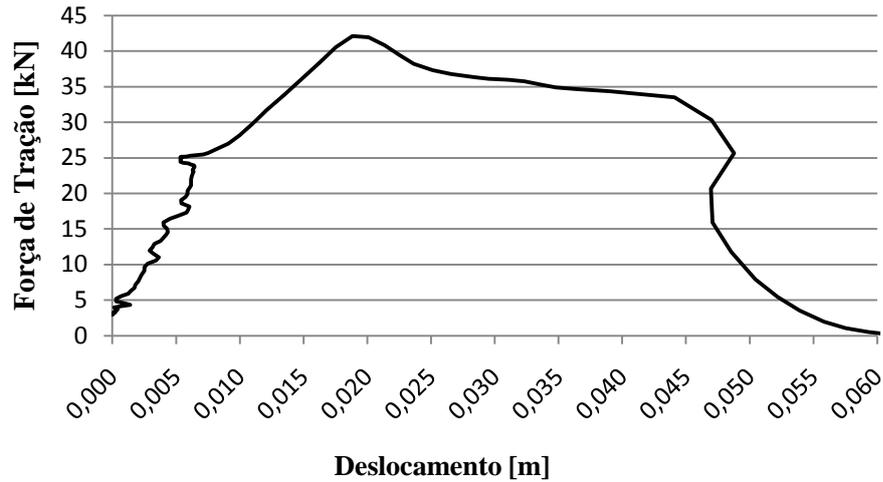


GRÁFICO 4.11- Tração de bobinamento com  $\theta = 3\pi/2$  rad. no mordente do LB1.

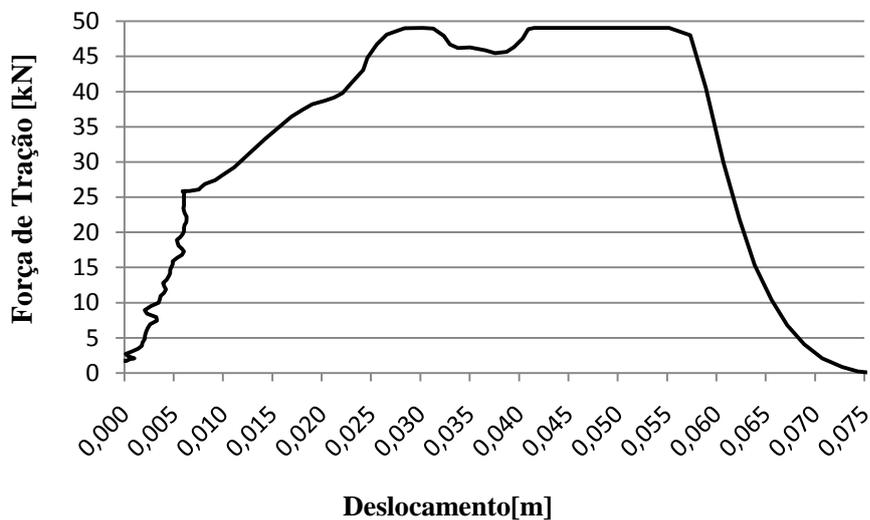


GRÁFICO 4.12- Tração de bobinamento com  $\theta = 7\pi/4$  rad. no mordente do LB1.

Observando-se os GRA. 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, percebe-se que não houve deslizamento da tira com baixa tração, como ocorreu nos testes de tração direta. Ocorreu uma elevação das trações com pequenos deslocamentos (em torno de 0,010 m), que se justifica pela completa acomodação da tira sobre o raio de curvatura da régua guia do mordente e sobre a luva de aço. Na sequência, as trações continuam subindo, até que a tira se solte completamente do mordente.

A TAB. 4.4 apresenta os valores de máxima tração de bobinamento medidos no dispositivo com arco de contato; o GRA. 4.13 apresenta os resultados da tração de bobinamento em função do arco de contato; o GRA. 4.14 apresenta as curvas de tração de bobinamento obtidas através dos cálculos analíticos e através das medições realizadas com o dispositivo de tração com arco de contato.

TABELA 4.4  
Resultado do modelo físico para tração de bobinamento no LB1.

Projeto	$L$ [m]	$t_o$ [m]	$\sigma_y$ [MPa]	$r$ [m]	$R$ [m]	$\varphi$ [rad]	$\theta$ [rad]	$T_m$ [N]	$T_p$ [N]	$TB$ [N]
LB1	0,100	2,85E-03	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	0	9133	22180	22180
LB1	0,100	2,85E-03	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$\pi/2$	9133	22180	25869
LB1	0,100	2,85E-03	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$\pi$	9133	22180	35463
LB1	0,100	2,85E-03	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$3\pi/2$	9133	22180	46578
LB1	0,100	2,85E-03	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$7\pi/4$	9133	22180	53955

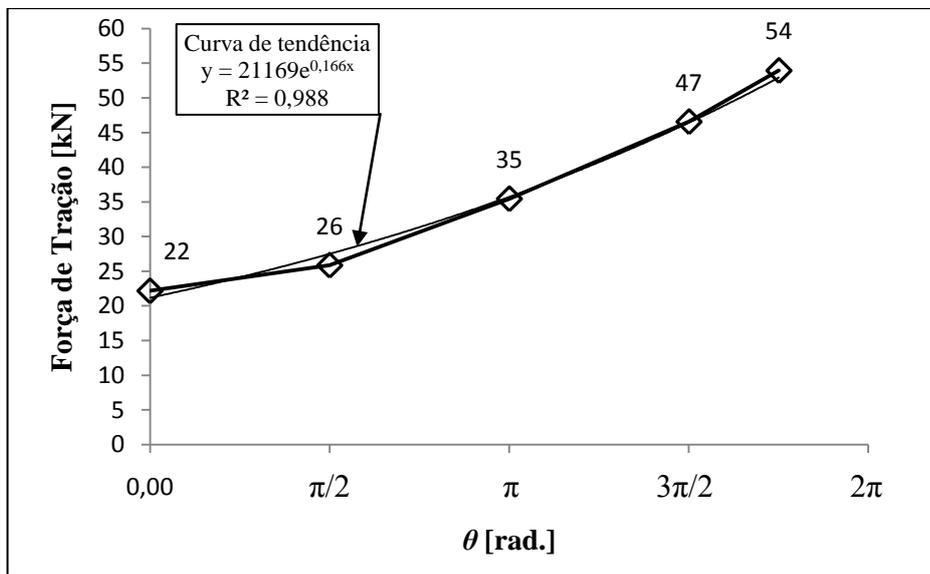


GRÁFICO 4.13 - Tração de bobinamento medida no projeto do LB1.

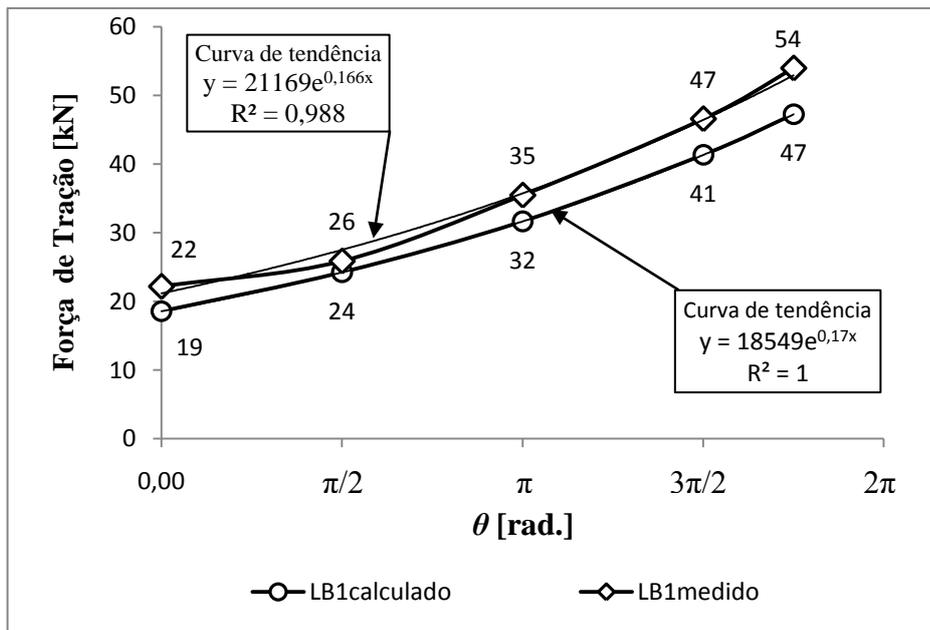


GRÁFICO 4.14 - Tração de bobinamento medida e calculada no projeto do LB1.

Os valores de tração medidos e apresentados no GRA. 4.13 indicam boa aproximação exponencial. Os valores indicados no GRA. 4.13 são as médias dos valores obtidos nos testes realizados para cada arco de contato; logo, podem apresentar diferenças, quando comparados com os valores indicados nos GRA. 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, os quais apresentam resultados individuais.

Pode-se observar, no GRA. 4.14, uma boa aproximação dos valores obtidos no modelo físico com os valores calculados. A diferença média entre os valores calculados e medidos foi de 12 %.

O GRA. 4.15 mostra a contribuição das forças de tração do mordente ( $T_m$ ) e tração plana ( $T_p$ ) na tração de bobinamento ( $TB$ ).

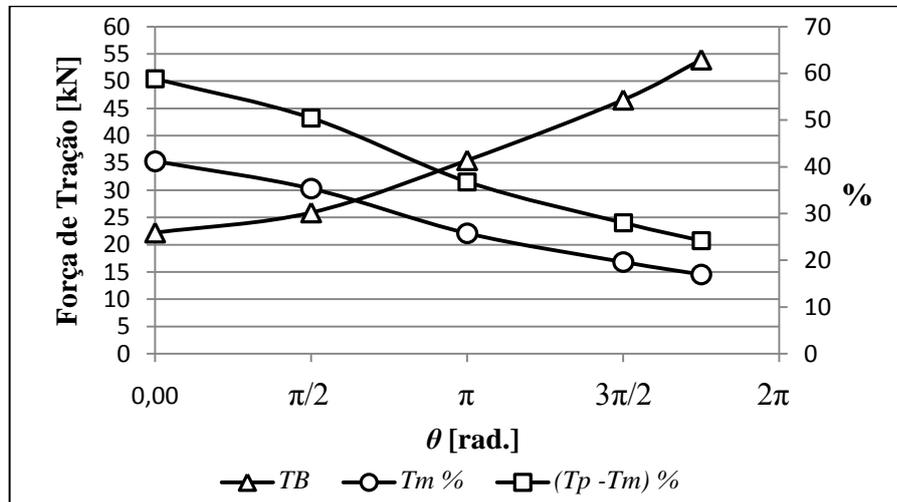


GRÁFICO 4.15 – Influência de  $T_m$  e  $T_p$  na tração de bobinamento medida para projeto do LB1.

Nota-se, no GRA. 4.15, que a curva referente à  $(T_p - T_m)$  possui grande influência na tração de bobinamento  $TB$ . Assim, pode-se afirmar que essa contribuição no valor de  $TB$  é devida ao dobramento da tira sobre o raio de curvatura da régua guia do mordente e também ao atrito nesta interface.

#### 4.4 Resultados do modelo analítico para o mordente alterado do LB1

##### 4.4.1 Cálculo da força de tração de bobinamento – projeto alterado

Após a conclusão dos testes com o mordente do LB1, desmontaram-se as régua do mordente para avaliação de desgaste nas regiões onde é feita a mordedura da tira. Através de inspeção visual, não foram encontrados desgastes significativos nos dentes. A régua móvel

estava praticamente nova, com pequenos arranhões na superfície, e a régua fixa apresentou pequenas deformações nas quinas dos dentes. Tendo-se em vista validar os resultados, decidiu-se por retificar os dentes da régua fixa, a fim de se restabelecerem as condições originais. Entretanto, ao final da retífica, ficou pendente o ajuste no final do último dente, ou seja, a região inclinada após o último dente ficou desalinhada com as quinas dos demais dentes, gerando um degrau, como mostra, em detalhe, a FIG. 4.2.

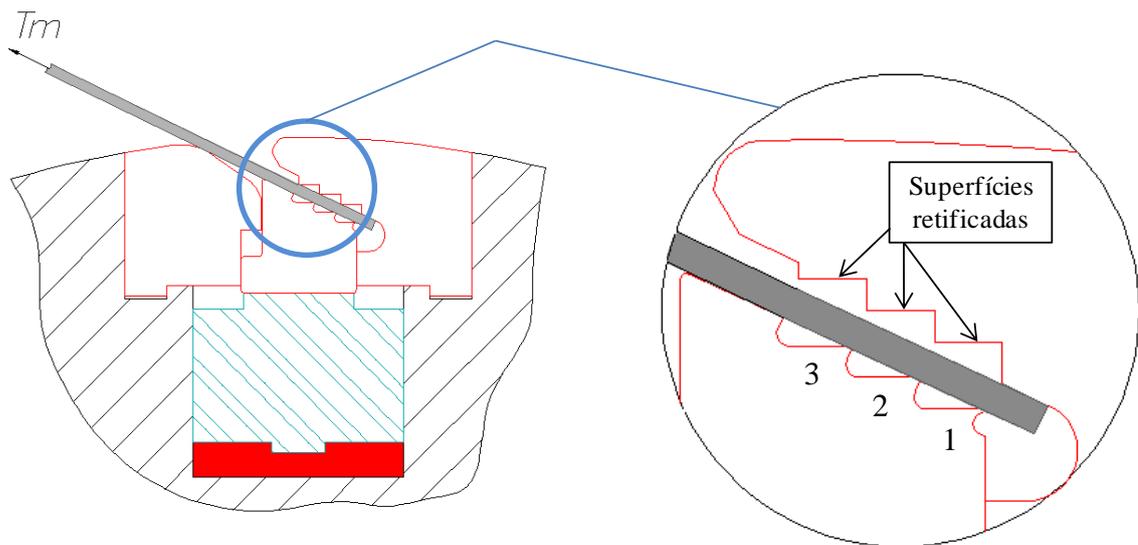


FIGURA 4.2 – Detalhe da alteração na geometria dos dentes da régua fixa do LB1.

Com essa alteração, a tira será inicialmente forçada pelo primeiro dente sobre uma superfície de contato bem menor, comparando-se com o projeto original. Adicionalmente, ficará sujeita a esforço de flexão nessa região.

A força de mordedura ( $F_M$ ) calculada foi de 147 kN/m, mesmo valor utilizado no experimento anterior. Com base nesse valor, determinaram-se as pressões hidráulicas de atuação do mordente, utilizando-se a EQ. (3.8).

Em seguida, foi feita a medição da tração do mordente no dispositivo de medição de tração direta, utilizando-se uma tira de 0,100 m de largura. O valor encontrado foi de  $T_m = 27164$  N.

A tração de bobinamento ( $TB$ ) foi calculada para tira com 0,100 m de largura, com base na tração direta medida ( $T_m$ ), no atrito ( $\mu$ ) medido na interface tira e segmento (a seco), no arco de contato ( $\theta$ ) entre a tira e o mandril, no arco de contato ( $\varphi$ ) da tira com o raio externo da régua guia e das componentes de flexão da tira sobre a régua guia ( $\Delta T_m$ ) e da tira sobre o mandril ( $\Delta T_p$ ). A TAB. 4.5 apresenta os valores para tração de bobinamento; o GRA. 4.16, a curva em função do arco de contato.

TABELA 4.5

Resultado do modelo analítico para tração de bobinamento referente ao projeto alterado do LB1.

Projeto	$L$ [m]	$t_o$ [m]	$\sigma_y$ [MPa]	$r$ [m]	$R$ [m]	$\varphi$ [rad]	$\theta$ [rad]	$\mu$	$T_m$ [N]	$\Delta T_m$ [N]	$T_p$ [N]	$\Delta T_p$ [N]	$TB$ [N]
LB1	0,100	2,85E-3	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	0	0,17	27164	7755	38740	323	39063
LB1	0,100	2,85E-3	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$\pi/2$	0,17	27164	7755	38740	323	51020
LB1	0,100	2,85E-3	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$\pi$	0,17	27164	7755	38740	323	66637
LB1	0,100	2,85E-3	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$3\pi/2$	0,17	27164	7755	38740	323	87033
LB1	0,100	2,85E-3	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$7\pi/4$	0,17	27164	7755	38740	323	99465

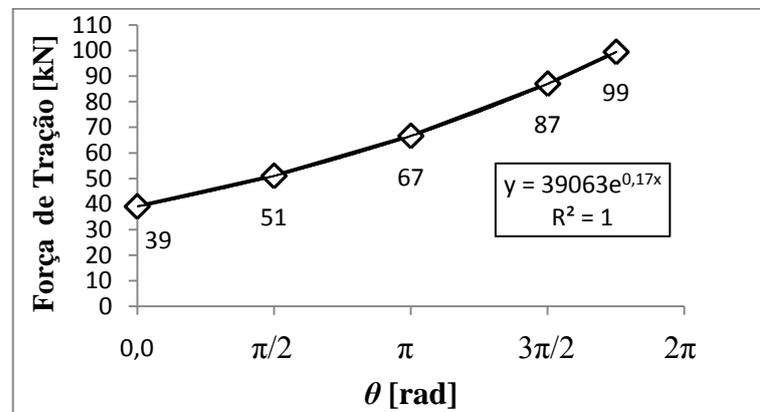


GRÁFICO 4.16 - Tração de bobinamento calculada para o projeto alterado do LB1.

## 4.5 Resultados do modelo físico para o mordente alterado do LB1

### 4.5.1 Medição da força de tração direta – projeto alterado

Realizaram-se novos testes com o dispositivo de medição de tração direta, com os mesmos parâmetros utilizados na avaliação do projeto original, com tiras de largura de 0,050 m, 0,100 m e 0,150 m. Os GRA. 4.17, 4.18 e 4.19 apresentam os resultados.

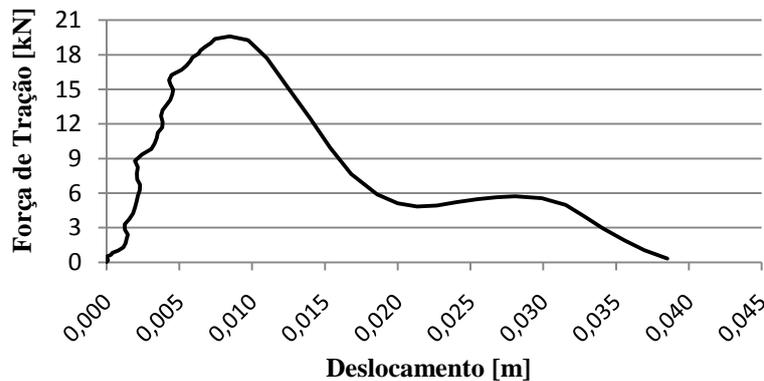


GRÁFICO 4.17 - Tração direta medida em tira de 0,050 m no mordente alterado do LB1.

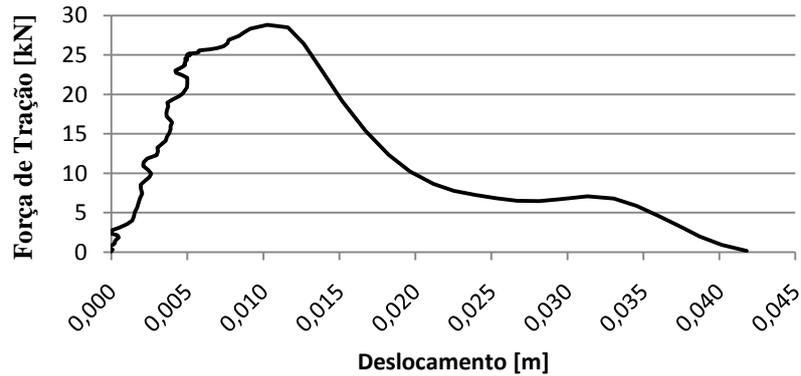


GRÁFICO 4.18 - Tração direta medida em tira de 0,100 m no mordente alterado do LB1.

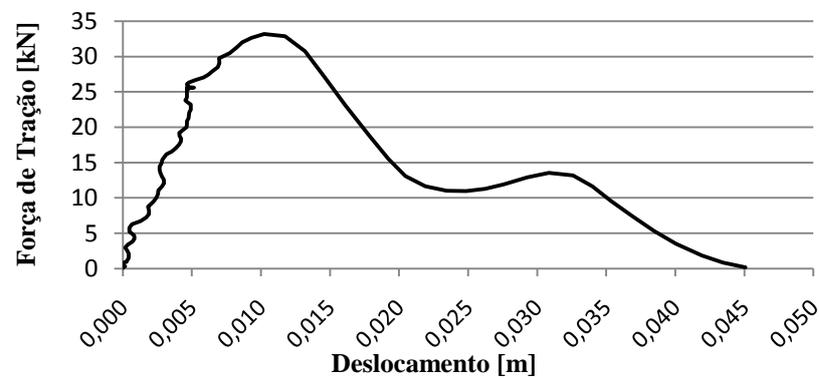


GRÁFICO 4.19 - Tração direta medida em tira de 0,150 m no mordente alterado do LB1.

Observa-se, nos GRA. 4.17, 4.18 e 4.19, que, para todas as larguras de tiras, houve uma elevação de força, com pequeno deslocamento até o limite máximo de capacidade do mordente, quando se iniciou o deslizamento e a redução da força.

O GRA. 4.20 apresenta os valores de tração em função das larguras de tira, bem como a curva de tendência com a respectiva equação.

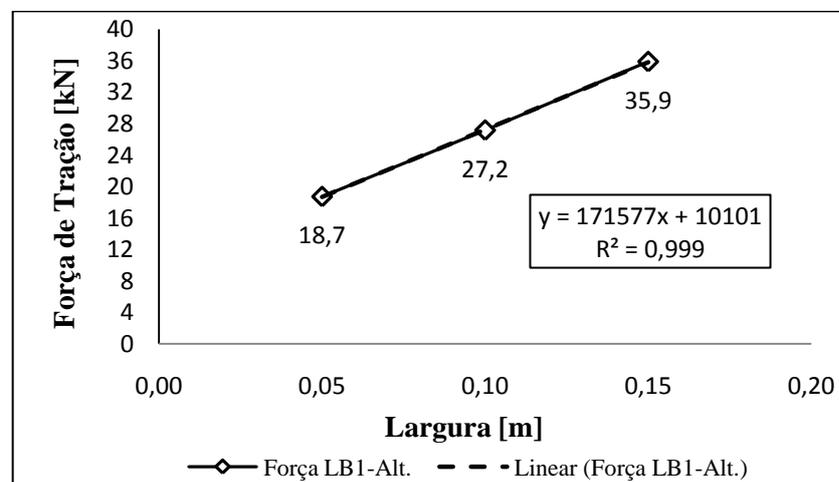


GRÁFICO 4.20 – Tração direta x largura referente ao projeto alterado do LB1.

#### 4.5.2 Medição da força de tração com variação do arco de contato – projeto alterado

Utilizando-se a mesma metodologia empregada nos testes para o projeto original, realizaram-se novos testes com tiras de 0,100 m.

O GRA. 4.21 apresenta os valores de tração medidos sem arco de contato.

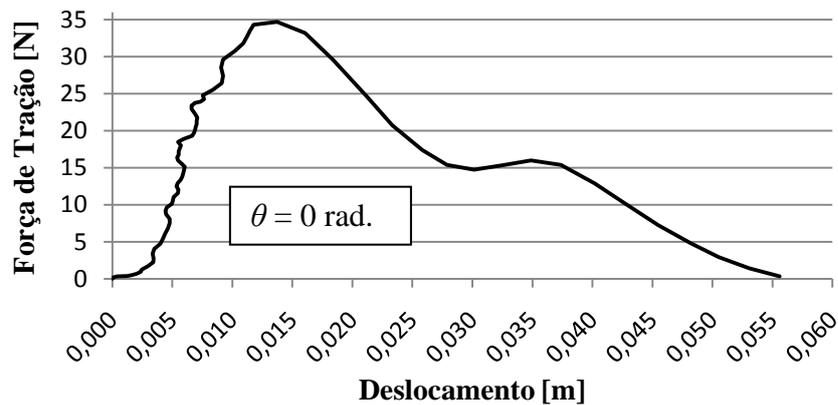


GRÁFICO 4.21 - Tração de bobinamento sem arco de contato no mordente alterado do LB1.

Observa-se, no GRA. 4.21, que o comportamento da força foi muito similar às forças medidas no dispositivo de tração direta, apresentando uma elevação com pequeno deslocamento e, posteriormente, redução da força até o desprendimento da tira do mordente.

Entretanto, para os demais arcos de contato, não se conseguiu medir a máxima força de tração, porque a resistência do mordente foi superior à capacidade do dispositivo de medição de tração, que é de 50 kN. O GRA. 4.22 apresenta o resultado de uma medição feita com arco de contato de  $3\pi/2$  rad.

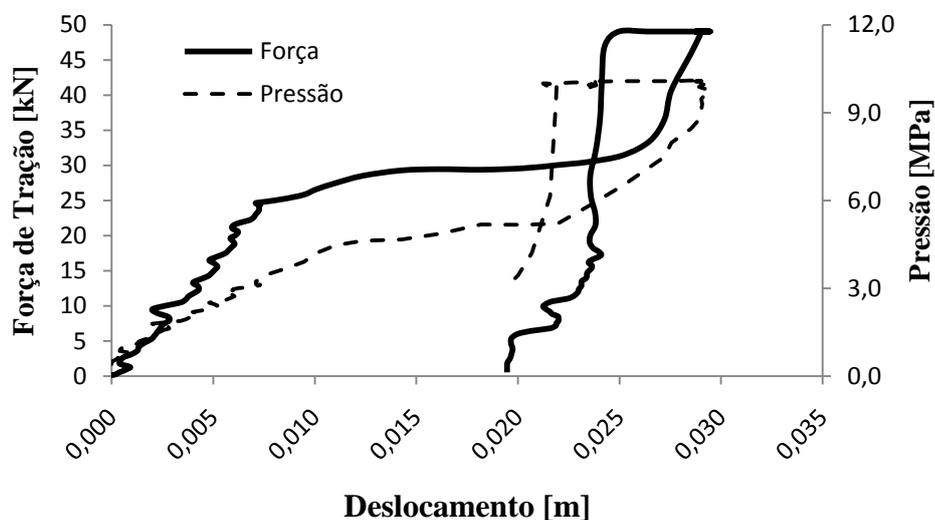


GRÁFICO 4.22 - Tração de bobinamento com  $\theta = 3\pi/2$  rad. mordente alterado do LB1.

Observando-se o GRA. 4.22, percebe-se que houve simultaneamente deslizamento da tira e elevação da tração até o limite de 50 kN. Parte do deslocamento é devido à acomodação da tira sobre o raio de curvatura da régua guia do mordente e sobre a luva de aço. O deslocamento contrário das curvas indica o retorno elástico da tira no momento que a aplicação de força foi desativada. Observa-se, ainda, que o valor da pressão hidráulica de alimentação do cilindro de tração chegou ao limite máximo de 10 MPa.

Nesse caso, a tração de bobinamento foi definida pela tração medida no dispositivo de tração direta ( $T_m$ ), pela tração medida com  $\theta = 0$  rad. e utilizando-se a EQ. (3.5), tendo-se em vista que as medições do projeto original apresentaram boa aproximação exponencial.

A TAB. 4.6 apresenta os valores de máxima tração de bobinamento para o projeto alterado do LB1; o GRA. 4.23 apresenta os resultados da tração de bobinamento em função do arco de contato; o GRA. 4.24 apresenta as curvas de tração de bobinamento obtidas somente através dos cálculos analíticos e através das medições realizadas com o dispositivo de tração com arco de contato.

TABELA 4.6

Resultado do modelo físico para tração de bobinamento no projeto alterado do LB1.

Projeto	$L$ [m]	$t_o$ [m]	$\sigma_y$ [MPa]	$r$ [m]	$R$ [m]	$\varphi$ [rad]	$\theta$ [rad]	$T_m$ [N]	$T_p$ [N]	$TB$ [N]
LB1	0,100	2,85E-03	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	0	27164	35139	35139
LB1	0,100	2,85E-03	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$\pi/2$	27164	35139	45895
LB1	0,100	2,85E-03	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$\pi$	27164	35139	59943
LB1	0,100	2,85E-03	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$3\pi/2$	27164	35139	78291
LB1	0,100	2,85E-03	363	0,0127	0,305	$\pi/5$	$7\pi/4$	27164	35139	89474

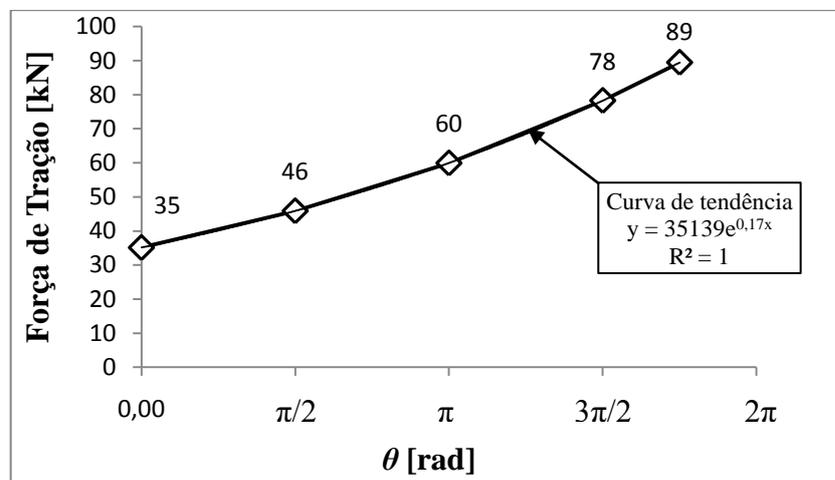


GRÁFICO 4.23 - Tração de bobinamento medida no mordente alterado do LB1.

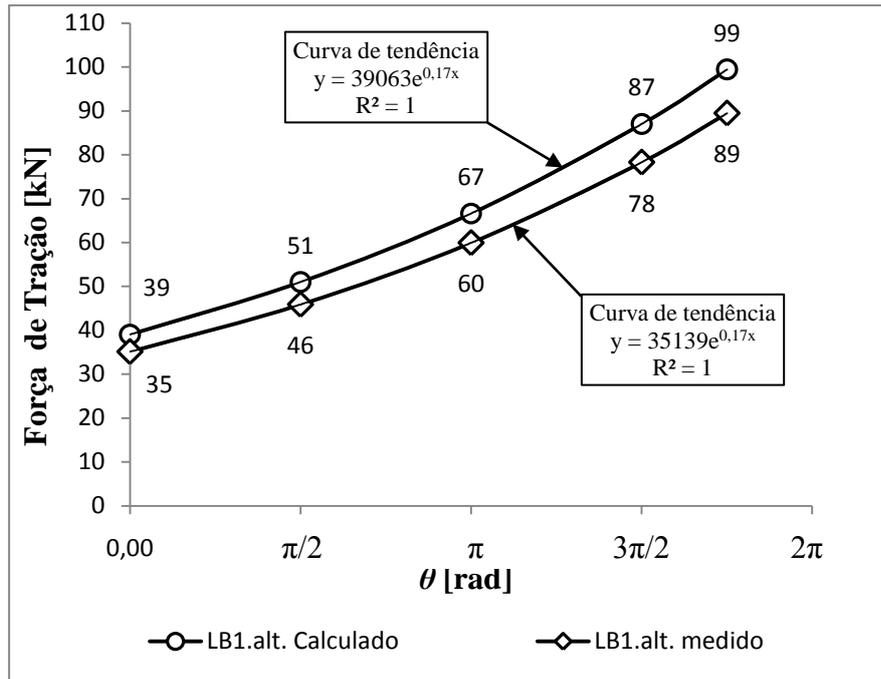


GRÁFICO 4.24 - Tração de bobinamento medida e calculada para o mordente alterado do LB1.

Pode-se observar, no GRA. 4.24, fazendo-se uma comparação entre os projetos original e alterado, que houve uma inversão das curvas obtidas no modelo físico com o modelo analítico. Nesse experimento, os valores medidos ficaram, em média, 10 % abaixo dos valores calculados, enquanto, no projeto original, os valores medidos ficaram, em média, 12 % acima dos valores calculados.

O GRA. 4.25 mostra a contribuição das forças de tração do mordente ( $T_m$ ) e tração plana ( $T_p$ ) na tração de bobinamento medida ( $T_B$ ).

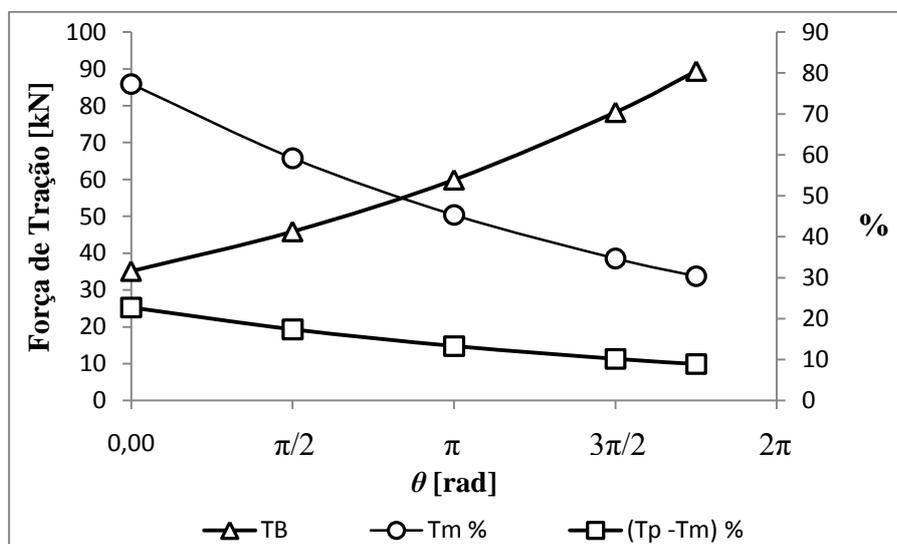


GRÁFICO 4.25 - Influência de  $T_m$  e  $T_p$  na tração de bobinamento para projeto alterado do LB1.

Nota-se, no GRA. 4.25, que a tração do mordente ( $T_m$ ) possui grande influência na tração de bobinamento ( $TB$ ), o que não ocorreu na avaliação do projeto do mordente original. Assim, pode-se afirmar que essa contribuição no valor ( $T_m$ ) sobre  $TB$  é devida à alteração inserida empiricamente na régua fixa do mordente.

Apesar de não se ter conseguido medir  $TB$  para todos os arcos de contato, acredita-se que a curva apresentada no GRA. 4.23 é uma boa aproximação dos valores reais, uma vez que, a partir de  $\theta = \pi/2$  rad., a força de tração ultrapassou o limite do dispositivo de medição.

#### 4.6 Resultados da medição do atrito entre a tira e o segmento do LB4

De forma idêntica ao caso LB1, realizou-se a medição do atrito entre a tira e o segmento do mandril do LB4. Os testes foram executados para três condições de lubrificação: a seco, lubrificado com óleo mineral utilizado no processo de laminação e lubrificado com a mistura de óleo e graxa utilizada na lubrificação dos mandris. O GRA. 4.26 apresenta os valores de atrito para as três condições.

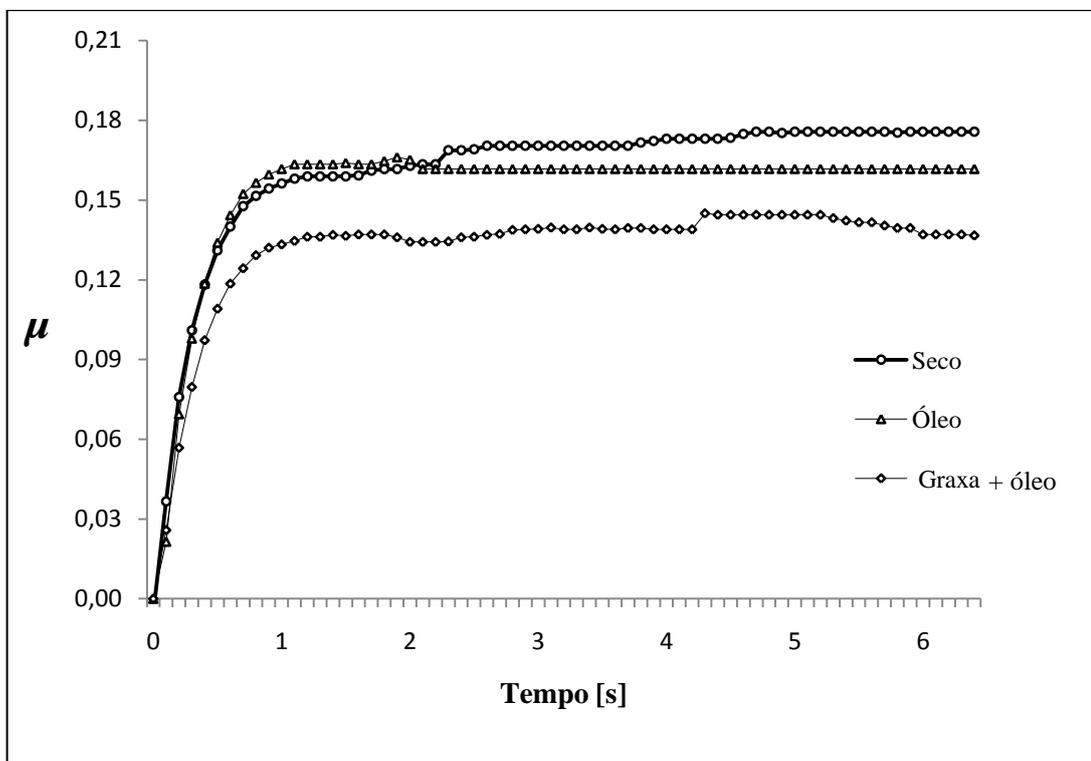


GRÁFICO 4.26 - Influência da lubrificação no atrito tira/segmento do LB4.

Observa-se, no GRA. 4.26, a diferença dos valores do atrito em função da

condição de lubrificação. Fazendo-se uma comparação com os valores obtidos no experimento realizado com o segmento do mandril do LB1 (GRA. 4.2), observa-se uma pequena diferença dos valores de atrito para a condição de lubrificação com óleo + graxa. Observa-se, ainda, que o atrito na condição a seco referente a esse caso apresentou valores menores que no caso anterior. Acredita-se que essa diferença seja devida à menor rugosidade do segmento do LB4.

#### 4.7 Resultados do modelo analítico para o mordente do LB4

##### 4.7.1 Cálculo da força de tração de bobinamento

A força de mordedura ( $F_M$ ) calculada foi de 147 kN/m, mesmo valor utilizado nos casos anteriores. Com base nesse valor, determinaram-se as pressões hidráulicas de atuação do mordente, utilizando-se a EQ. (3.8).

Em seguida, foi feita a medição da tração do mordente no dispositivo de medição de tração direta, utilizando-se uma tira de 0,100 m de largura. O valor encontrado foi de 13636 N.

A tração de bobinamento ( $TB$ ) foi calculada utilizando-se as EQ. (3.3 a 3.6) para tira com 0,100 m de largura, com base na tração direta calculada ( $T_m$ ), no atrito ( $\mu$ ) medido na interface tira e segmento (a seco), no arco de contato ( $\theta$ ) entre a tira e o mandril, no arco de contato ( $\varphi$ ) da tira com o raio de curvatura da régua guia e das componentes de flexão da tira sobre a régua guia ( $\Delta T_m$ ) e da tira sobre o mandril ( $\Delta T_p$ ).

A TAB. 4.7 apresenta os valores para tração de bobinamento; o GRA. 4.27, a curva em função do arco de contato.

TABELA 4.7

Resultado do modelo analítico para tração de bobinamento referente ao projeto do LB4.

Projeto	$L$ [m]	$t_o$ [m]	$\sigma_y$ [MPa]	$r$ [m]	$R$ [m]	$\varphi$ [rad]	$\theta$ [rad]	$\mu$	$T_m$ [N]	$\Delta T_m$ [N]	$T_p$ [N]	$\Delta T_p$ [N]	$TB$ [N]
LB4	0,100	2,85E-3	363	0,011	0,305	$\pi/10$	0	0,17	13636	8522	23443	307	23750
LB4	0,100	2,85E-3	363	0,011	0,305	$\pi/10$	$\pi/2$	0,17	13636	8522	23443	307	31020
LB4	0,100	2,85E-3	363	0,011	0,305	$\pi/10$	$\pi$	0,17	13636	8522	23443	307	40514
LB4	0,100	2,85E-3	363	0,011	0,305	$\pi/10$	$3\pi/2$	0,17	13636	8522	23443	307	52915
LB4	0,100	2,85E-3	363	0,011	0,305	$\pi/10$	$7\pi/4$	0,17	13636	8522	23443	307	60474

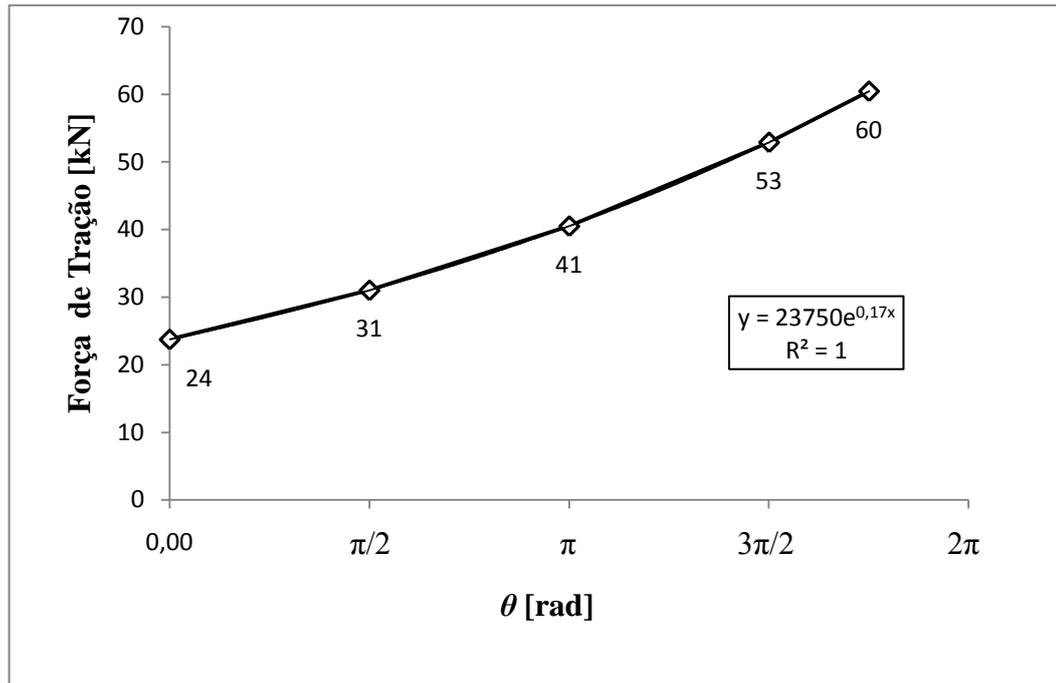


GRÁFICO 4.27 - Tração de bobinamento calculada para o projeto do LB4.

## 4.8 Resultados do modelo físico para o mordente do LB4

### 4.8.1 Medição da força de tração direta

A aplicação da metodologia para medição da máxima força de tração aplicada na tira tem também o objetivo de verificar e validar o modelo através da repetibilidade dos valores medidos e do comportamento da tração em função da largura da tira. Como no caso anterior, foram utilizadas tiras com larguras de 0,050 m, 0,100 m e 0,150 m.

Inicialmente, foi medida a pressão hidráulica ( $P_m$ ) necessária para vencer a força de mola ( $F_m$ ) e a força de atrito ( $F_a$ ). Em seguida, definiram-se as pressões de alimentação do mordente para cada largura de tira, utilizando-se a EQ. (3.8) e os dados relacionados abaixo:

- Força de mordedura ( $F_M$ ) de 147 kN/m;
- Largura da tira ( $L$ ) de 0,100 m;
- Número de pistões ( $n$ ) igual a 8;
- Área do pistão ( $A_p$ ) de 1,59E-3 m<sup>2</sup>.

A TAB. 4.8 apresenta os valores de pressão utilizados para cada largura de tira testada.

TABELA 4.8  
Pressão de alimentação do mordente do LB4.

Largura	Pressão do mordente ( $P_m$ )
0,050 m	1,35 MPa
0,100 m	1,90 MPa
0,150 m	2,45 MPa

Uma extremidade da tira foi introduzida no mordente, e a outra foi conectada à célula de carga. Após aplicação de pressão hidráulica para acionar o mordente, realizou-se um pequeno deslocamento do cilindro de tração, de forma a se eliminarem as folgas de montagem. Na sequência, foi zerado o indicador de força e acionado o cilindro de tração, até a tira se desvincular das réguas do mordente. Os valores de tração e deslocamento da tira foram coletados e analisados através do programa IbaAnalyzer®.

Os GRA. 4.28, 4.29 e 4.30 apresentam os resultados da medição de tração nas tiras de 0,050 m, 0,100 m e 0,150 m.

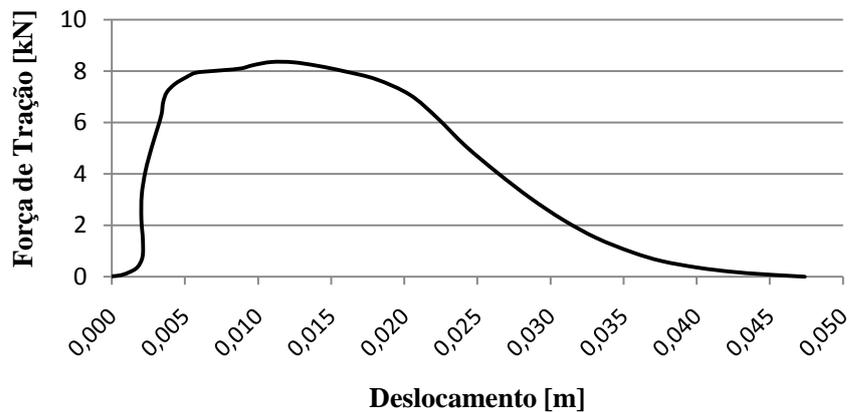


GRÁFICO 4.28- Tração em tira de 0,050 m medida no mordente do LB4.

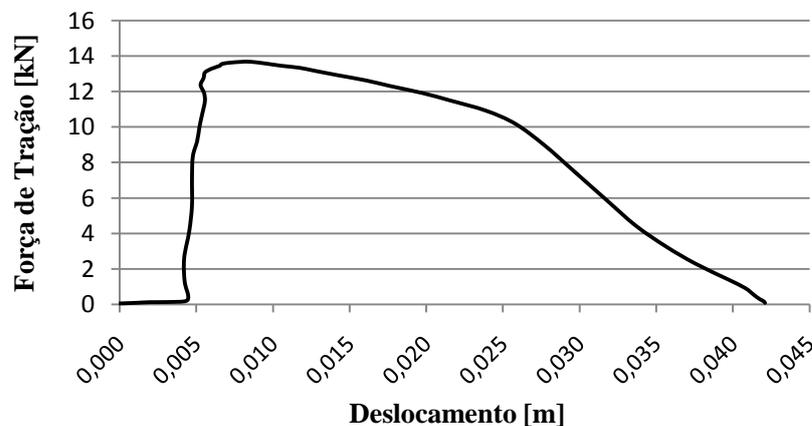


GRÁFICO 4.29 - Tração em tira de 0,100 m medida no mordente do LB4.

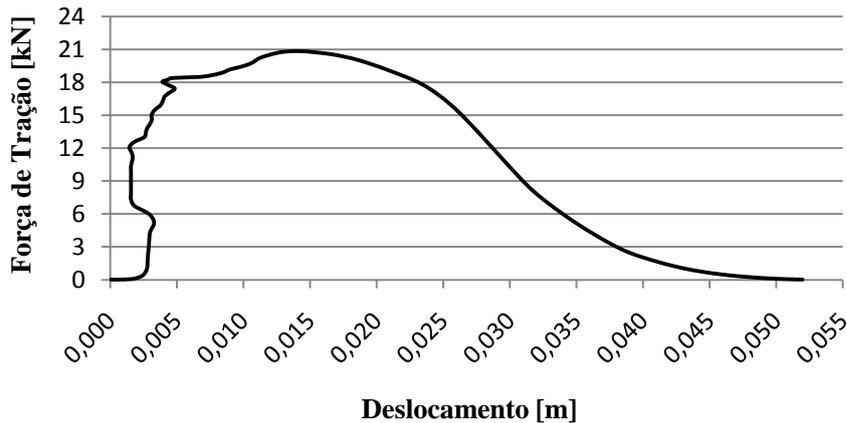


GRÁFICO 4.30 - Tração em tira de 0,150 m medida no mordente do LB4.

Observa-se nos GRA. 4.28, 4.29 e 4.30, que, para todas as larguras de tiras, houve uma elevação de força, sem deslocamento, até o limite máximo de capacidade do mordente, quando se iniciou o deslizamento e a redução da tração.

O GRA. 4.31 apresenta os valores de tração em função das larguras de tira, bem como a curva de tendência, com a respectiva equação.

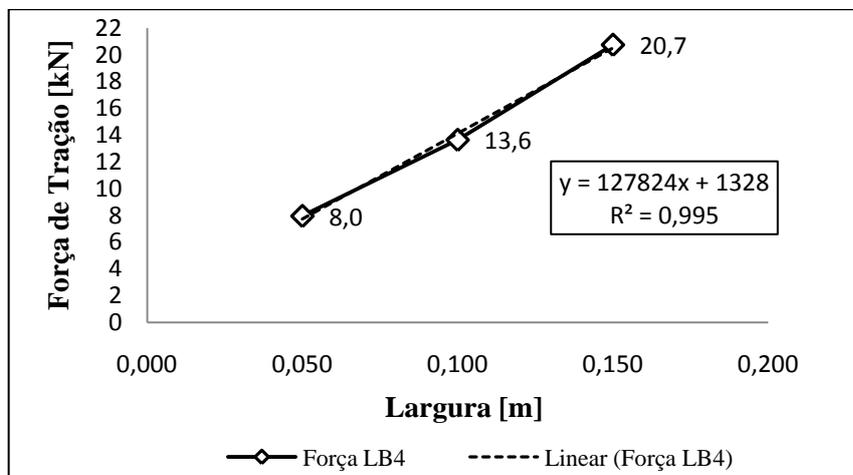


GRÁFICO 4.31 - comportamento da tração x largura medida no mordente do LB4.

Como nos casos anteriores, observa-se, no GRA. 4.31, que o valor de  $R^2$  indica uma excelente linearidade entre os pontos.

#### 4.8.2 Medição da força de tração com variação do arco de contato

As medições realizadas no dispositivo de tração com arco de contato da tira com a luva de aço objetivaram avaliar a influência do atrito e do arco de contato no valor da máxima

tração de bobinamento da tira.

Inicialmente, foram medidas as rugosidades dos materiais envolvidos no processo, como mostra a TAB. 4.9.

TABELA 4.9  
Rugosidades medidas no segmento do LB4, tiras e luva de aço.

Segmento do LB4	Tiras metálicas	Luva de aço
$1,6 R_a$	$3,0 R_a$	$2,0 R_a$

Os testes foram realizadas com tiras de 0,100 m de largura para os seguintes arcos de contato:  $\theta = 0$  rad.,  $\theta = \pi/2$  rad.,  $\theta = \pi$  rad.,  $\theta = 3\pi/2$  rad. e  $\theta = 7\pi/4$  rad. Definiu-se o arco de contato de  $\theta = 0$  rad. como sendo a tira conformada apenas na saída do mordente, a fim de se avaliar o efeito do dobramento da tira sobre a régua guia, na tração de bobinamento.

Após a introdução de uma extremidade da tira no mordente e aplicação de força hidráulica, a tira foi parcialmente conformada sobre a luva de aço, e a outra extremidade foi conectada à célula de carga. Em seguida, o cilindro de tração foi acionado o suficiente para acomodar a tira sobre a luva de aço, o que gerou uma força de pré-carga entre 1,8 kN a 2.3 kN; na sequência, foi acionado o cilindro em definitivo, até o desprendimento da tira do mordente.

Ao final de cada teste, foram realizados os procedimentos de limpeza das régua do mordente, da tira e da luva de aço.

Os GRA. 4.32, 4.33, 4.34, 4.35 e 4.36 apresentam os valores de tração para todos os arcos de contato definidos na metodologia.

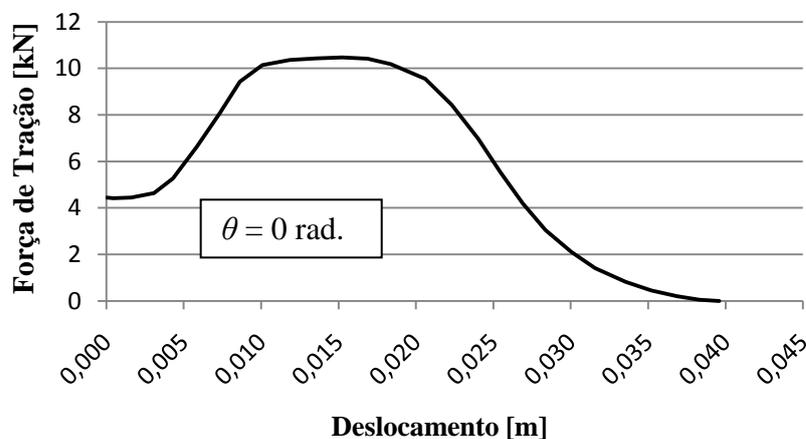


GRÁFICO 4.32 - Tração de bobinamento sem arco de contato no mordente do LB4.

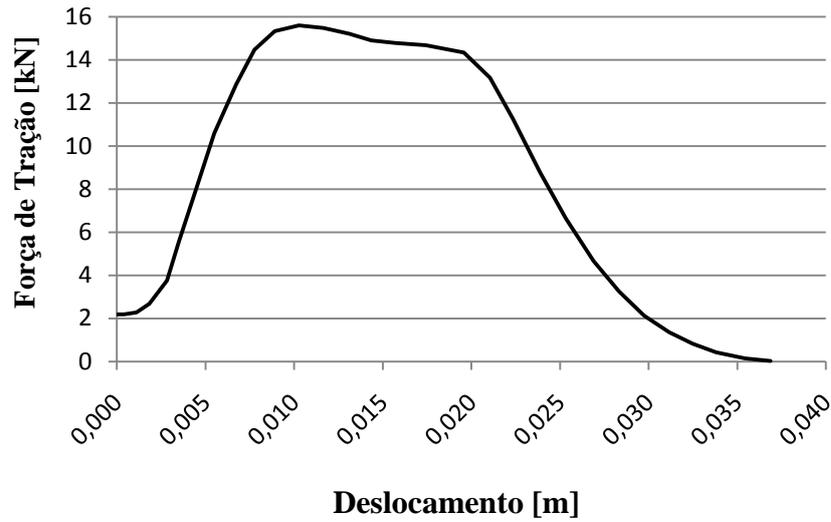


GRÁFICO 4.33 - Tração de bobinamento com  $\theta = \pi/2$  rad. no mordente do LB4.

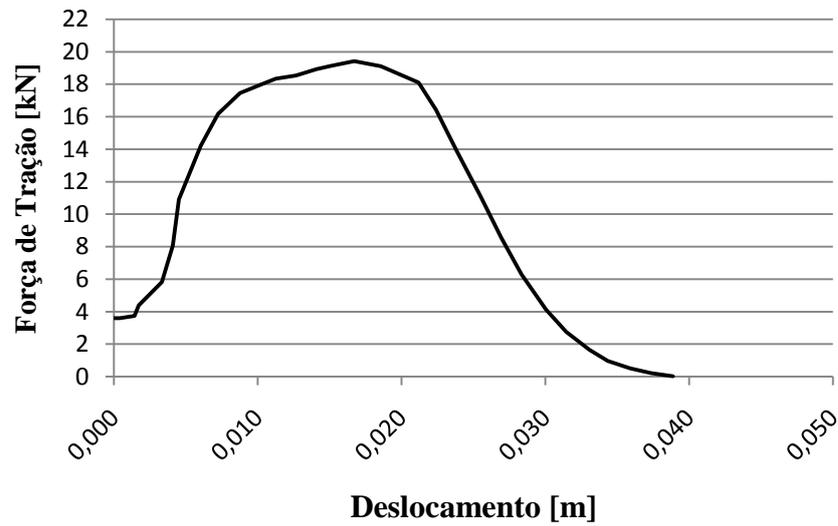


GRÁFICO 4.34 - Tração de bobinamento com  $\theta = \pi$  rad. no mordente do LB4.

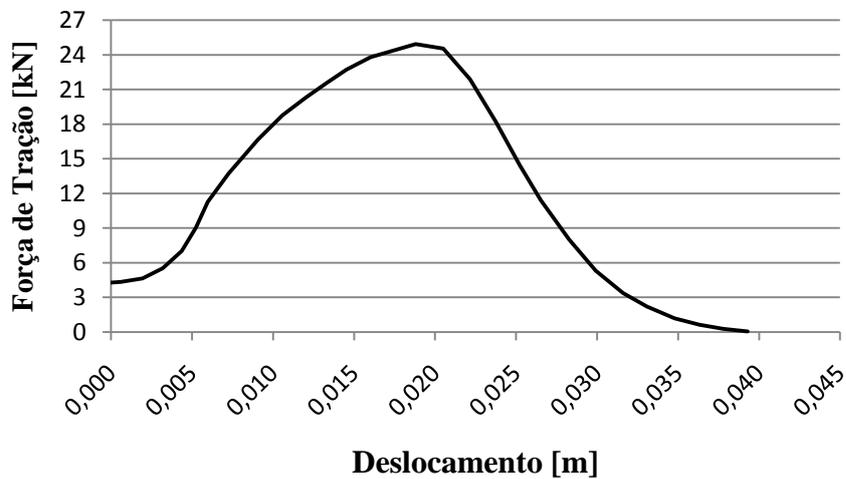


GRÁFICO 4.35 - Tração de bobinamento com  $\theta = 3\pi/2$  rad. no mordente do LB4.

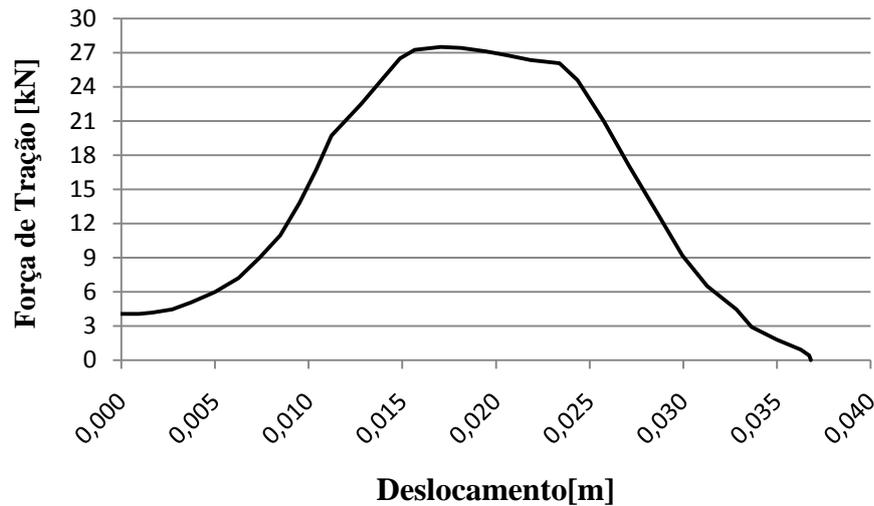


GRÁFICO 4.36 - Tração de bobinamento com  $\theta = 7\pi/4$  rad. no mordente do LB4.

Observando-se os GRA. 4.32, 4.33, 4.34, 4.35 e 4.36, percebe-se que não houve deslizamento da tira com baixa tração, como ocorreu nos testes de tração direta realizados com o projeto original do LB1. Ocorreu uma elevação das trações com pequenos deslocamentos (em torno de 0,010 m), que se justifica pela completa acomodação da tira sobre o raio de curvatura da régua guia do mordente e sobre a luva de aço. Na sequência, as trações continuam subindo, até que a tira se solte completamente do mordente.

A TAB. 4.10 apresenta os valores de máxima tração de bobinamento medidos no dispositivo com arco de contato; o GRA. 4.37 apresenta os resultados da tração de bobinamento em função do arco de contato; o GRA. 4.38 apresenta as curvas de tração de bobinamento obtidas através dos cálculos analíticos e através das medições realizadas com o dispositivo de tração com arco de contato.

TABELA 4.10  
Resultado do modelo físico para tração de bobinamento no LB4.

Projeto	$L$ [m]	$t_o$ [m]	$\sigma_y$ [MPa]	$r$ [m]	$R$ [m]	$\varphi$ [rad]	$\theta$ [rad]	$T_m$ [N]	$T_p$ [N]	$TB$ [N]
LB4	0,100	2,85E-3	363	0,011	0,305	$\pi/10$	0	13636	10507	10507
LB4	0,100	2,85E-3	363	0,011	0,305	$\pi/10$	$\pi/2$	13636	10507	14715
LB4	0,100	2,85E-3	363	0,011	0,305	$\pi/10$	$\pi$	13636	10507	18453
LB4	0,100	2,85E-3	363	0,011	0,305	$\pi/10$	$3\pi/2$	13636	10507	24937
LB4	0,100	2,85E-3	363	0,011	0,305	$\pi/10$	$7\pi/4$	13636	10507	28008

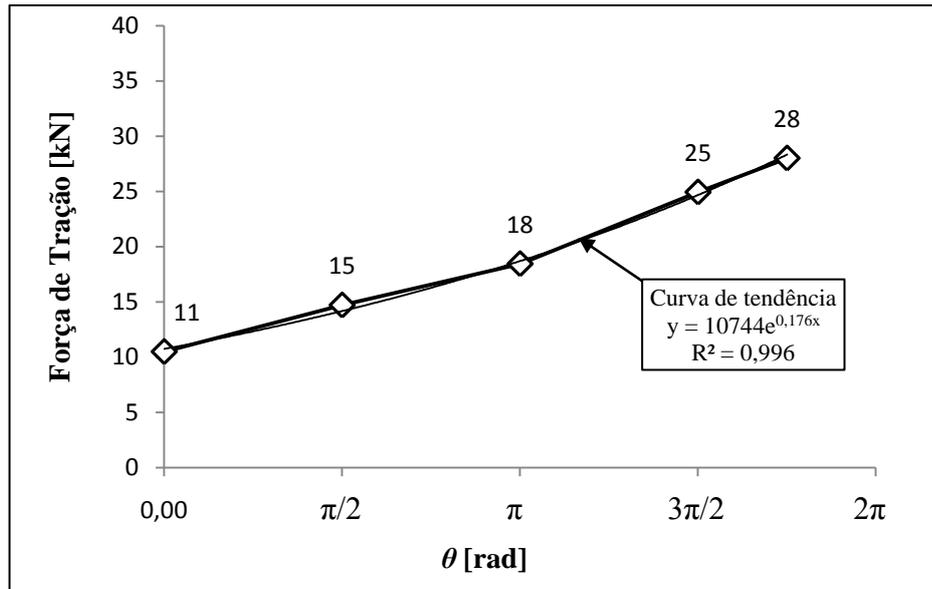


GRÁFICO 4.37 - Tração de bobinamento medida no projeto do LB4.

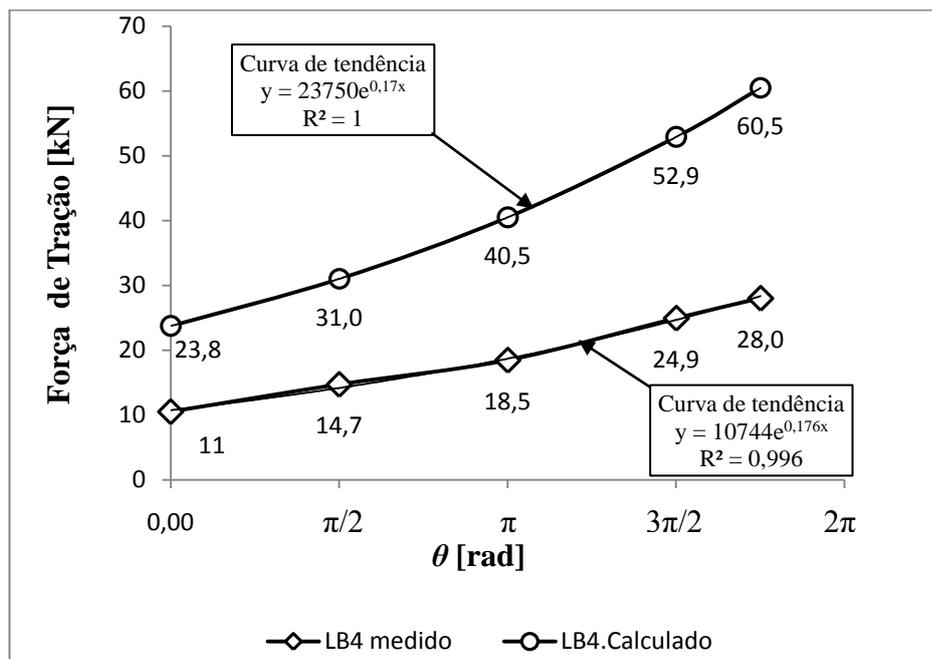


GRÁFICO 4.38 - Tração de bobinamento medida e calculada no projeto do LB4.

Os valores de tração medidos e apresentados no GRA. 4.37 indicam boa aproximação exponencial.

Pode-se observar, no GRA. 4.38, uma grande diferença entre os valores obtidos no modelo físico e os valores calculados para todos os arcos de contato avaliados. Os valores medidos ficaram, em média, 46 % abaixo dos valores calculados.

O GRA. 4.39 mostra a contribuição da força de tração de mordente ( $T_m$ ) na tração de bobinamento ( $T_B$ ).

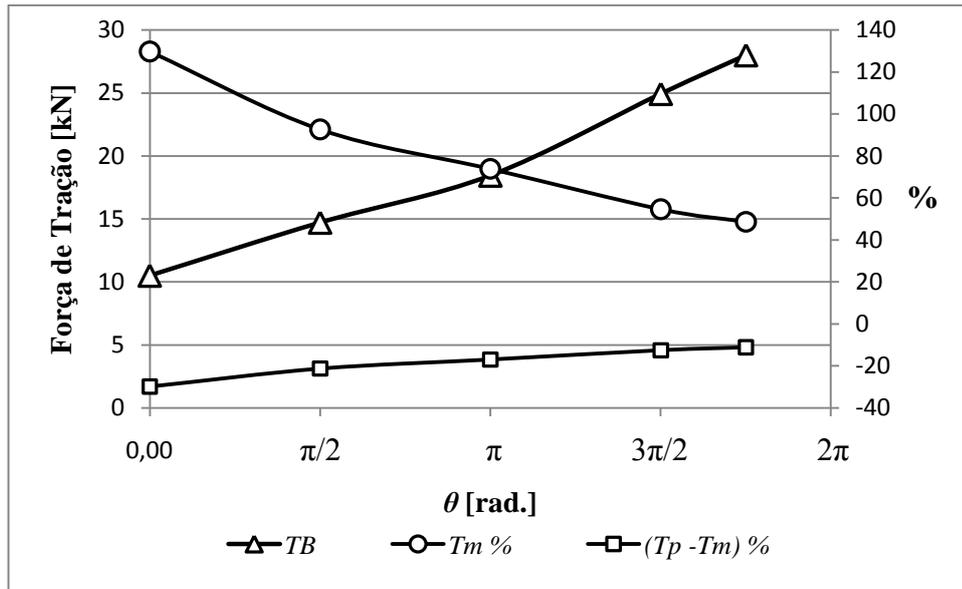


GRÁFICO 4.39 – Influência de  $T_m$  na tração de bobinamento medida para projeto do LB4.

Observando-se o GRA. 4.39, percebe-se que, na posição de segmento plano com  $\theta = 0$  rad., a tração do mordente ( $T_m$ ) ultrapassou 100 %. Isso implica dizer que  $T_m$  foi maior que  $T_p$ ; logo,  $T_p$  contribuiu negativamente na tração de bobinamento para todos os arcos de contato. Situação contrária aos experimentos anteriores e que se mantém superior para todos os demais arcos de contato. Esse fato pode ser explicado observando-se a FIG. 4.3, referente ao projeto do mordente do LB4.

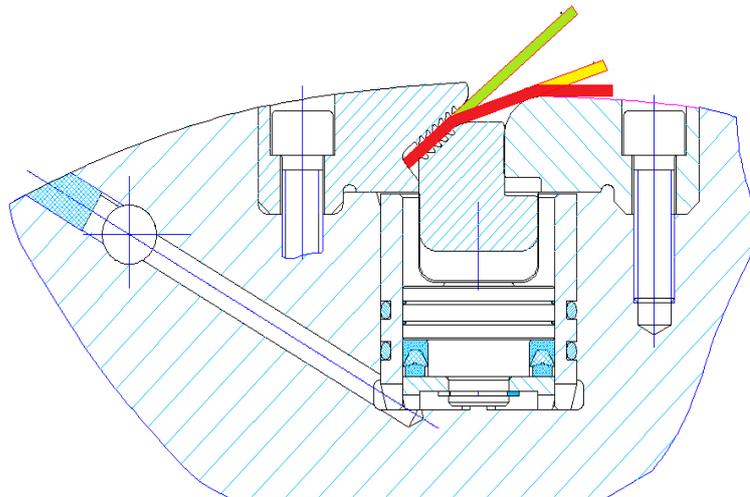


FIGURA 4.3 – Ação da força de dobramento da tira sobre a régua móvel do mordente do LB4.

Nota-se, na FIG 4.3, 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. O binário de força para dobramento da tira pode ser calculado utilizando-se a EQ. (2.3), e o valor pode

chegar a 9400 N, valor equivalente a 64 % da força do mordente ( $F_M$ ). 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.

#### 4.9 Resultados do modelo físico para o mordente do LB3

Conforme foi informado, o projeto do mordente do LB3 sofreu alteração e apresenta não conformidade na régua móvel; portanto, os testes completos para medição da tração de bobinamento foram suspensos. Dessa forma, serão apresentados, nesta seção, apenas os resultados dos testes de tração direta.

##### 4.9.1 Medição da força de tração direta

Seguindo-se o mesmo procedimento aplicado nos casos anteriores, foram medidas as forças de tração nas tiras com larguras de 0,050 m, 0,100 m e 0,150 m.

Foi medida a pressão hidráulica ( $P_m$ ) necessária para vencer a força de mola ( $F_m$ ) e a força de atrito ( $F_a$ ). Em seguida, definiram-se as pressões de alimentação do mordente para cada largura de tira, utilizando-se a EQ. (3.8) e os dados relacionados abaixo:

- Força de mordedura ( $F_M$ ) de 147 kN/m;
- Largura da tira ( $L$ ) de 0,100 m;
- Número de pistões ( $n$ ) igual a 10;
- Área do pistão ( $A_p$ ) de 1,59E-3 m<sup>2</sup>.

A TAB. 4.11 apresenta os valores de pressão utilizados para cada largura de tira testada.

TABELA 4.11  
Pressão de alimentação do mordente do LB3.

Largura	Pressão do mordente ( $P_m$ )
0,050 m	1,65 MPa
0,100 m	2,20 MPa
0,150 m	2,70 MPa

Os GRA. 4.40, 4.41 e 4.42 apresentam os resultados da medição de tração nas tiras de 0,050 m, 0,100 m e 0,150 m.

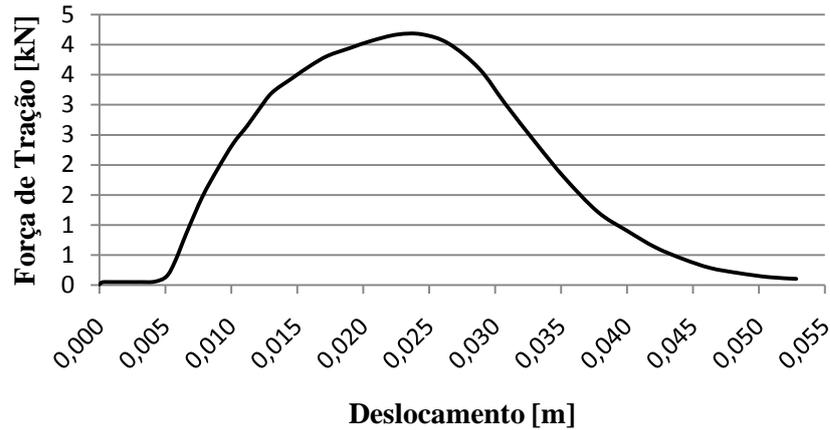


GRÁFICO 4.40 - Tração em tira de 0,050 m medida no mordente do LB3.

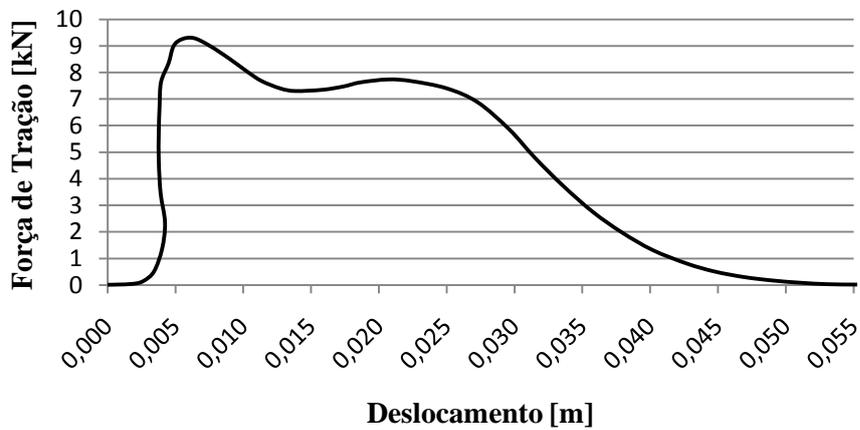


GRÁFICO 4.41 - Tração em tira de 0,100 m medida no mordente do LB3.

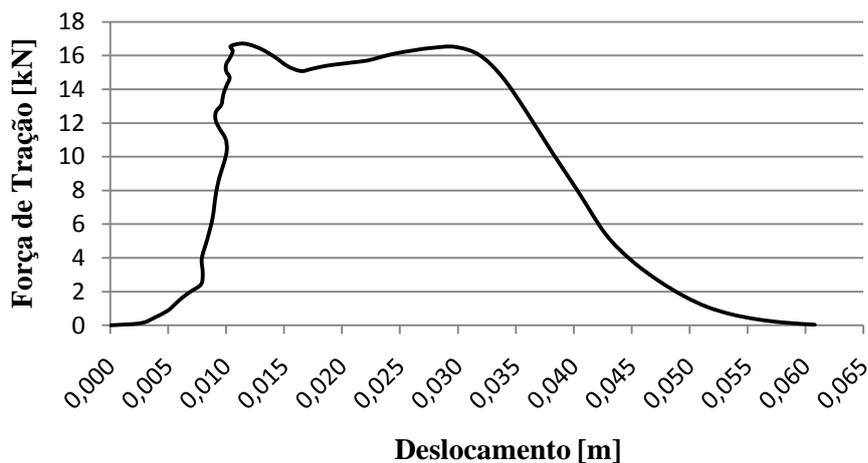


GRÁFICO 4.42 - Tração em tira de 0,150 m medida no mordente do LB3.

Observa-se, no GRA. 4.40 que, para tira de 0,050 m, houve elevação da força de tração, com deslocamento até o limite máximo de capacidade do mordente. Para tiras de 0,100 m e 0,150 m, o comportamento foi diferente, conforme mostrado nos GRA. 4.41 e 4.42.

Primeiro, ocorreu elevação da carga praticamente sem deslocamento até o limite máximo do mordente; na sequência, percebe-se o deslizamento da tira até o seu desprendimento do mordente.

O GRA. 4.43 apresenta os valores de tração em função das larguras de tira, bem como a curva de tendência, com a respectiva equação.

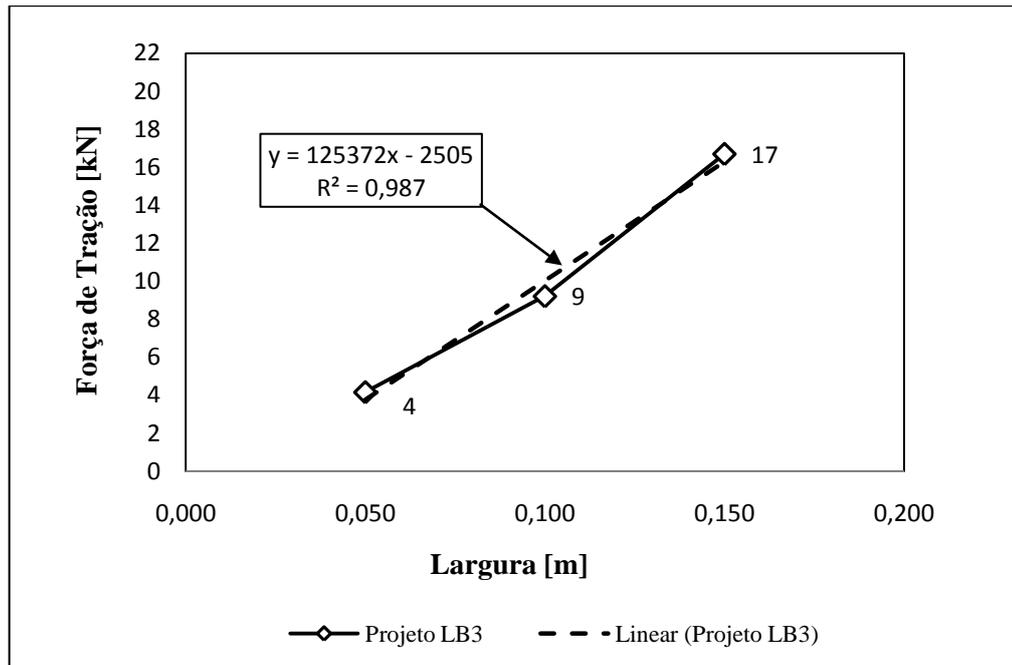


GRÁFICO 4.43 - comportamento da tração x largura medida no mordente do LB3.

Observa-se, no GRA. 4.43, que a linearidade dos pontos não foi tão boa quanto as medições feitas nos casos anteriores.

#### 4.10 Discussão dos resultados dos três projetos avaliados.

Os casos experimentais apresentaram características diferenciadas com relação à forma construtiva dos mordentes, bem como seu efeito sobre os valores obtidos no modelo físico. O projeto do mordente alterado do LB1 foi o que apresentou os melhores resultados, tanto nos testes de tração direta quanto na avaliação da tração de bobinamento.

Uma análise comparativa dos resultados encontrados nos cálculos e das medições realizadas com os dispositivos de tração direta e com arco de contato é apresentada a seguir, para a fim de esclarecer a influência dos modelos de régua, do arco de contato e do projeto como um todo, para cada mordente.

#### 4.10.1 Análise dos resultados – Tração direta

O GRA. 4.44 apresenta os resultados das medições de tração direta realizadas com os projetos dos três laminadores.

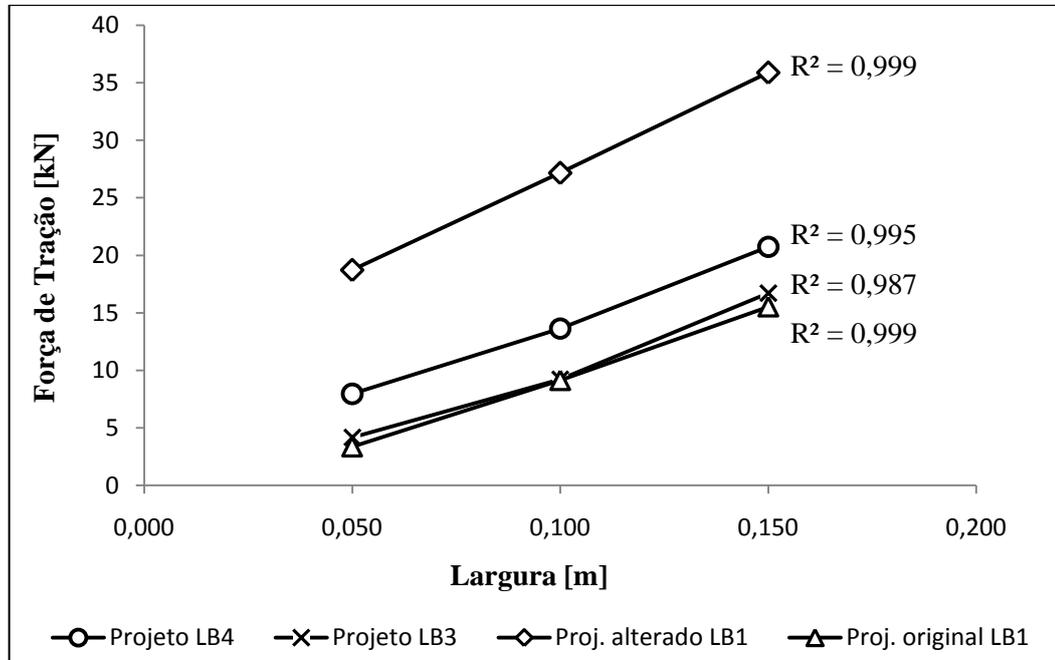


GRÁFICO 4.44 – Tração direta x largura dos projetos dos três laminadores.

Uma análise comparativa do GRA. 4.44 resulta nos seguintes comentários e afirmações:

(a) Comparando-se os coeficientes  $R^2$ , 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 das régua móvel e fixa foram danificados em função da inversão da sua posição, razão pela qual esse projeto não foi submetido à tração de bobinamento.

(b) Os projetos original e alterado do LB1 apresentaram resultados consistentes, mas com grandes diferenças. Esse fato pode ser explicado em função da modificação da régua fixa do mordente, inserida empiricamente, o que proporcionou uma pressão específica maior no primeiro dente da régua móvel, além do esforço de flexão na extremidade da tira.

(c) Comparando-se os projetos originais 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.

#### 4.10.2 Análise dos resultados – Tração de bobinamento

O GRA. 4.45 apresenta os resultados dos cálculos analíticos, bem como das medições de tração de bobinamento em função do arco de contato, realizadas com os projetos do LB1 e LB4.

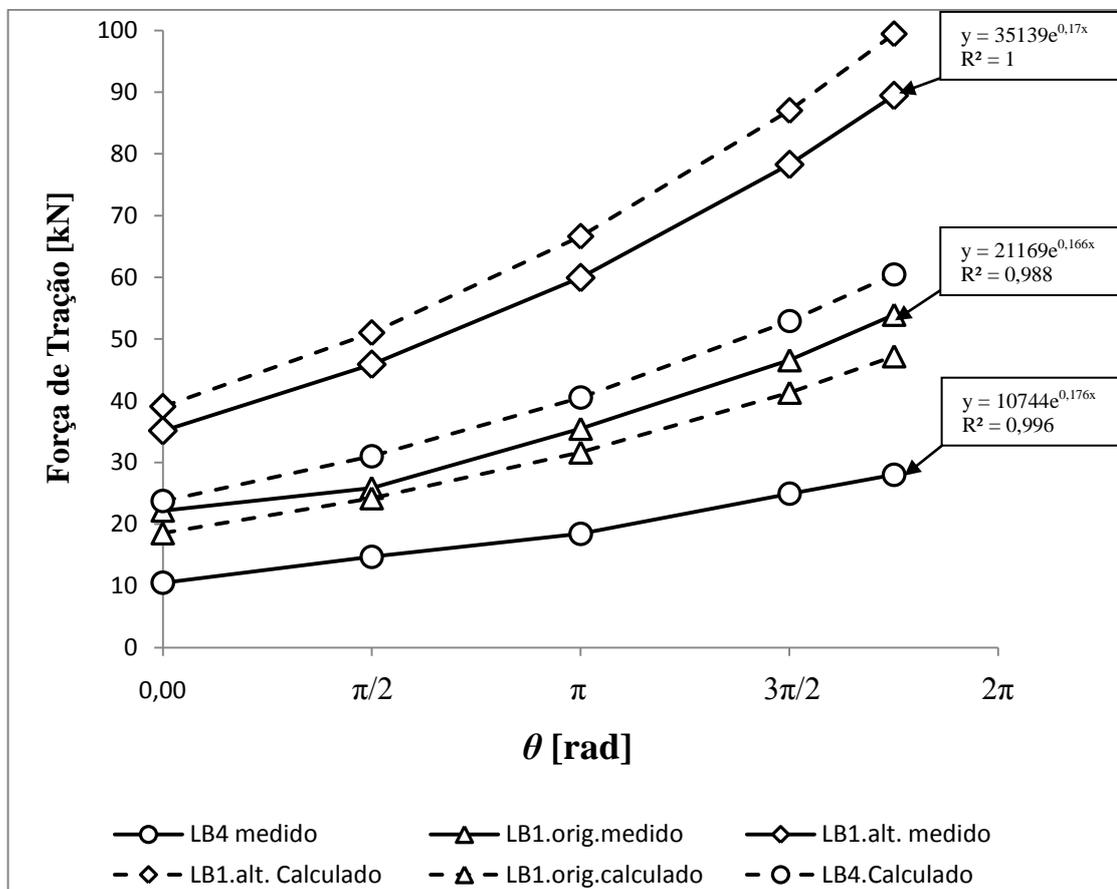


GRÁFICO 4.45 – Tração de bobinamento medida e calculada para os projetos do LB1 e LB4.

Uma análise comparativa do GRA. 4.45 permite fazer os seguintes comentários e afirmações:

(a) Após avaliação da aplicação da metodologia nos dois casos, comparando-se os coeficientes  $R^2$ , percebe-se que todos os projetos apresentaram excelente aproximação exponencial.

(b) Os testes feitos com o mordente alterado do LB1 superaram a capacidade do dispositivo de medição de tração com arco de contato, e os valores apresentados no GRA. 4.45 foram obtidos utilizando-se o modelo analítico. Mas, tendo-se em vista os resultados das medições de pressão hidráulica realizadas durante os testes, consideram-se esses valores de força ainda conservadores, uma vez que, com arco de contato a partir de  $\theta = \pi/2$  rad., o produto da pressão pela área da coroa do cilindro de tração ultrapassou 65 kN.

(c) Os resultados da tração de bobinamento medidos no projeto original 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.

(d) 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 original do LB1, o erro médio foi de 11 %. Os valores medidos foram maiores do que os valores obtidos no modelo analítico. Já no projeto alterado do LB1, o erro médio foi de 10 %. Os valores medidos foram menores do que os valores obtidos pelo modelo analítico.

(e) Embora os valores medidos experimentalmente também contenham erros, acredita-se que a principal fonte de erros esteja vinculada ao modelo analítico. Para melhor entender esse aspecto, seria fundamental medir as forças de dobramento da tira através de ensaios que utilizam rolos livres, onde se despreza o atrito entre as superfícies.

(e) Quanto à discrepância entre os valores de  $TB$  medidos e calculados referentes ao projeto do LB4, pode-se afirmar que foi devida à redução da força do mordente provocada pelo dobramento da tira sobre a régua móvel. O erro calculado foi de 54 %.

#### **4.11 Análise de viabilidade para condição industrial.**

Após a aplicação da metodologia nos casos experimentais, analisou-se a extrapolação dos dados para a condição industrial aplicada ao LB1, tendo-se em vista ser o

projeto que apresentou os melhores resultados experimentais. Nesse caso, a avaliação foi feita sobre o projeto original. O propósito desta exposição é apresentar uma análise de viabilidade da aplicação da metodologia, cujo benefício direto é *eleva o rendimento físico dos laminadores*.

#### 4.11.1 Aplicação do modelo analítico para tração de bobinamento

Tendo-se em vista que, na condição industrial, os mandris são constantemente expostos ao óleo de laminação, que é transportado pela tira, e devido à graxa utilizada na lubrificação dos mandris, utilizou-se atrito de 0,12, que foi obtido por medição indireta.

Os resultados obtidos no modelo analítico para o projeto original do LB1 são apresentados na TAB. 4.12.

TABELA 4.12  
Resultado da tração de bobinamento no mandril do LB1 para tira de 1,250 m.

Projeto	$C$ [m]	$L$ [m]	$t_o$ [m]	$\sigma_y$ [MPa]	$\varphi$ [rad]	$\theta$ [rad]	$\mu$	$T_m$ [N]	$\Delta T_m$ [N]	$T_p$ [N]	$\Delta T_p$ [N]	$TB$ [N]
LB1	0,800	1,250	2,85E-3	363	$\pi/5$	0	0,12	94493	91173	199767	3796	203563
LB1	0,800	1,250	2,85E-3	363	$\pi/5$	$\pi/2$	0,12	94493	91173	199767	3796	245788
LB1	0,800	1,250	2,85E-3	363	$\pi/5$	$\pi$	0,12	94493	91173	199767	3796	296773
LB1	0,800	1,250	2,85E-3	363	$\pi/5$	$3\pi/2$	0,12	94493	91173	199767	3796	358333
LB1	0,800	1,250	2,85E-3	363	$\pi/5$	$7\pi/4$	0,12	94493	91173	199767	3796	393747

Para definição da tração do mordente ( $T_m$ ), utilizou-se a curva de tendência obtida nos testes de tração direta, considerando-se o comprimento da régua de 0,800 m. Essa curva é apresentada pela EQ. (4.1).

$$y = 121644.C - 2822 \quad (4.1)$$

Para os cálculos da força de dobramento da tira sobre a régua guia ( $\Delta T_m$ ) e da força de dobramento da tira sobre o mandril ( $\Delta T_p$ ), considerou-se o valor da largura da tira de 1,250 m.

Os resultados da tração de bobinamento ( $TB$ ) foram obtidos através do modelo analítico; portanto, podem ser conservadores, uma vez que, no caso experimental realizado

com o mordente original do LB1, os valores de  $TB$  ficaram acima dos valores calculados.

O GRA. 4.46 ilustra o comportamento da tração de bobinamento ( $TB$ ) em função do arco de contato.

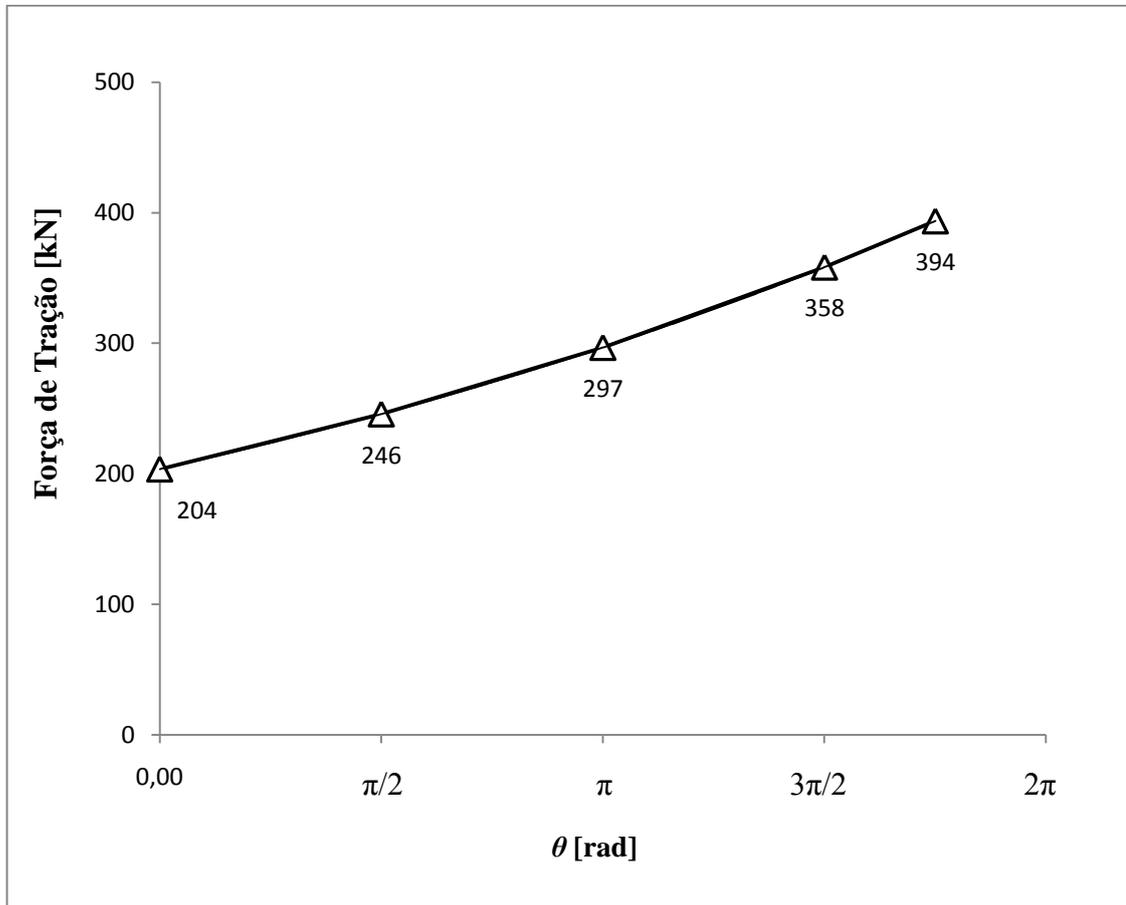


GRÁFICO 4.46 – Tração de bobinamento de tira de 1,250 m no mandril do LB1.

Os resultados do GRA. 4.46 indicam que a partir de  $\theta = 3\pi/2$  rad. se pode aplicar a tração máxima disponível no LB1, que é de 350 kN.

A EQUAÇÃO (4.2) descreve a curva de tendência exponencial para a tração de bobinamento.

$$TB = 203560 \cdot \exp(0,12\theta) \quad (4.2)$$

#### 4.11.2 Execução dos testes no equipamento

Os testes foram realizados com cinco bobinas de aço AISI 304 com 1,250 m de

largura e espessura de 2,85E-3 m. Consistiram no enrolamento de  $\frac{3}{4}$  de volta no mandril esquerdo ( $\theta = 3\pi/2$  rad.), após a tira ter sido presa no mordente, com os seguintes parâmetros de processo:

- Tração de 350 kN (máxima do equipamento);
- Rampa de tração de 70 kN/s;
- Pressão hidráulica de alimentação do mordente de 10 MPa;
- Mandril umedecido com o óleo de processo;
- Oito passes de laminação.

Não foram realizados testes variando o arco de contato da tira com o mandril. A utilização de arco com  $\theta = 3\pi/2$  rad. foi escolhida, por ser o arco mínimo admissível para aplicação da tração de bobinamento, tendo-se em vista limitação do dimensionamento das barras de guia do segmento do mandril, conforme estudo feito por Guimarães (2009).

A tração foi aplicada com  $\frac{3}{4}$  de volta, iniciando-se o bobinamento da tira; após inversão de sentido para o novo passe, a tira foi desbobinada até a mesma posição do início do bobinamento,  $\frac{3}{4}$  de volta. A tira se manteve presa no mordente durante todos os passes de laminação, em todas as bobinas testadas.

Com base no exposto acima, pode-se concluir que os valores obtidos no modelo analítico estão coerentes com as condições reais de processo, uma vez que, a partir de  $\theta = 3\pi/2$  rad., o modelo apresenta valores de tração acima da capacidade do equipamento.

A ponta grossa da tira que não é laminada tem um comprimento fixo, que se refere à distância do centro da cadeira de laminação até o eixo do mandril; um comprimento variável, que depende do quanto de tira está enrolado no mandril, ou seja, do arco de contato. Dessa forma, tem-se uma perda fixa e uma perda variável, a qual pode ser alterada pela mudança do arco de contato.

A análise da viabilidade da aplicação da metodologia se baseia na possibilidade de ganho de rendimento físico. O GRA. 4.47 apresenta o ganho em peso de tira, em função do arco de contato, considerando-se a produção mensal de 6000 t/mês de bobina com largura de 1,250 m e espessura de 2,85E-3 m. Os valores se referem ao ganho de peso mensal em relação ao processo padrão de 1,5 volta de tira enrolada no mandril.

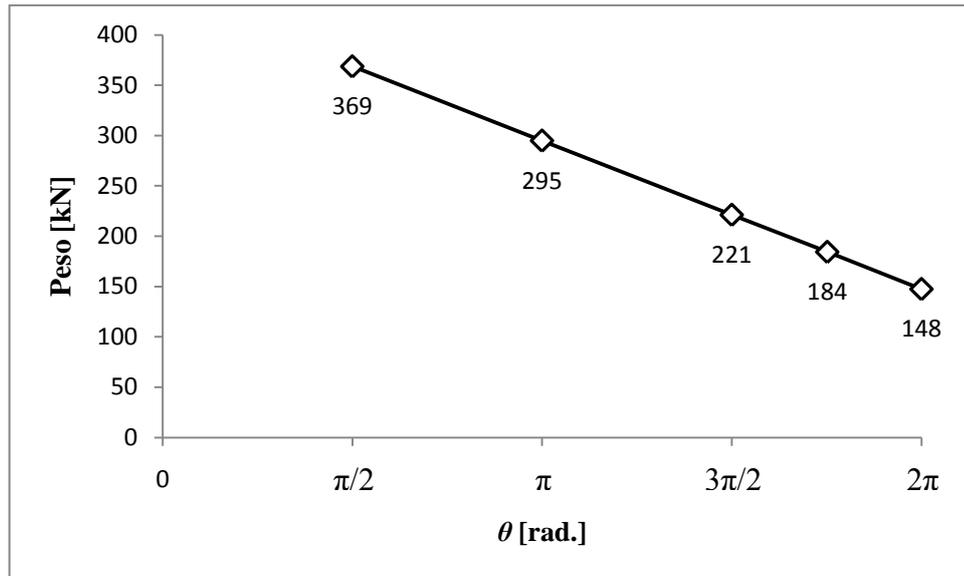


GRÁFICO 4.47 – Ganho em peso referente à redução do comprimento de ponta grossa no LB1.

Observa-se, no GRA. 4.47, que, quanto menor for o arco de contato da tira com o mandril, maior será o ganho, uma vez que a perda variável será reduzida. Como existe a limitação dimensional das barras de guia do segmento do mandril, o maior ganho seria com arco de contato de  $3\pi/2$  rad. (3/4 de volta).

## 5 CONCLUSÕES

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 próximo 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 metodologia para determinação do atrito médio na interface tira e mandril apresentou resultados satisfatórios. Os valores obtidos para o atrito no bobinamento de tiras estão coerentes com os usados pela literatura.

A excelente linearidade dos valores medidos no dispositivo de tração direta indicou que os dados podem ser extrapolados para larguras reais de processo de aços planos.

A proposta de avaliação do mordente do mandril do LB3 teve que ser suspensa em função da não conformidade geométrica encontrada na régua do mordente. Essa condição implicou danificação dos dentes da régua móvel após os primeiros testes realizados no dispositivo de tração direta.

A alteração empírica inserida no projeto do LB1 provocou um incremento dos valores de tração direta e da tração de bobinamento, superando a capacidade do dispositivo de medição de tração com arco de contato. Os valores para tração de bobinamento foram obtidos com base na tração plana, medida sem arco de contato e utilizando-se o modelo analítico. Esse fato sugere uma reavaliação do projeto original, com o objetivo de verificar outros efeitos, tais como desgaste prematuro do primeiro dente, com perda da capacidade do mordente.

Os resultados da tração de bobinamento referentes ao projeto original do LB1 apresentaram valores bem superiores aos medidos no projeto do LB4. 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. Com isso, conclui-se que o projeto original do LB1 é o mais adequado para a condição de enrolamento de menos de uma volta no mandril.

Com relação à análise da viabilidade de aplicação da metodologia, foi avaliada a possibilidade de redução do comprimento de ponta grossa com o enrolamento de menos de uma volta de tira no mandril. Demonstrou-se que o projeto original do mordente do LB1 permite a aplicação de máxima tração na tira com o enrolamento a partir de  $\frac{3}{4}$  de volta no mandril, o que resulta em ganhos consideráveis de rendimento físico, quando comparado com a prática atual de bobinamento de 1,5 volta.

Para redução do comprimento de ponta grossa no LB3 e LB4, será necessária a revisão dos projetos dos mordentes, tendo-se como base o modelo do LB1. Uma vez implantadas as alterações nos processos de bobinamento dos três laminadores, com o enrolamento de  $\frac{3}{4}$  de volta nos mandris, utilizando-se como referência o programa de produção do ano de 2010, será possível um incremento de produção de 1300 t/ano, o que representa uma redução de perdas da ordem de R\$ 1.400.000,00.

## **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Objetivando-se dar continuidade e enriquecer as informações apresentadas neste trabalho, listam-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Redimensionar o dispositivo de medição de tração com arco de contato para capacidade de 100 kN, para se confirmarem os resultados referentes ao projeto de mordente alterado do LB1.
- Desenvolver um modelo computacional que possa ser usado para avaliação de outros modelos de mordente.
- Utilizar um servo sistema em malha fechada, equipado com servo válvula, a fim de melhorar o controle de força e velocidade dos dispositivos.
- Desenvolver um modelo analítico para cálculo da tração direta sobre os mordentes.
- Executar revisão no projeto do mordente do LB3 e submetê-lo a testes experimentais.
- Redimensionar as barras de guia do segmento do LB1, a fim de executar testes na condição industrial, com menores arcos de contato.

## ABSTRACT

In this work the development of a methodology is presented for evaluation of the capacity of the mandrel grippers of the coilers of Sendzimir cold rolling mills. The grippers are mechanisms composed of bars with hydraulic performance, whose function is to fasten and grip the strip end at the start of the winding process and thus allow the application of tension. The methodology consists of the development of physical models built close to the real scale, which were submitted to experimental tests with the purpose of identifying the maximum tension of strip winding as a result of the contact arc of the strip with a cylindrical surface similar to the rolling mill mandrel. The model was also used to characterize the friction between the strip and the mandrel. Generally, the winding practice considers that the application of tension can only be started after the wrapping up of at least 1.5 turn of strip onto the mandrel, which generates a decline in physical performance in the rolling mills. The main objective of this work is to evaluate the capacity of the grippers of the mandrel keeping in mind the application of tension with less than a rolling of the strip wound up onto the mandrel. The methodology was applied in three experimental cases in which mandrel segments that are equipped with grippers from three rolling mills were used. The results of the winding tension measured in the physical model in function of the contact arc were shown close to those obtained in the analytical model. A viability analysis for the industrial condition was also carried out, in which the benefits reached with application of the methodology was demonstrated, bearing in mind the high contribution margin of flat steels. The adoption of this methodology will allow the evaluation of the capacity of other grippers projects in order to optimize the strip winding process.

*Key Words: mill, winding, mandrel, gripper, friction.*

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM G 143. **Standard Test Method for Measurement of Web/Roller Friction Characteristics**. American Society for Testing and Materials. 2009.
- Budinski, K.G. **Friction lubrication and wear technology**. ASM Metals Handbook, v. 18, 1992.
- Budinski, K.G. **Friction of plastic webs**. Tribology international, v.34, n.9, p. 625-633, 2001.
- Dieter, G.E. **Mechanical Metallurgy**. 3 ed. London: McGraw-Hill Book Company, 1988. 751p.
- Duprez, J.L. **Sendzimir Manual**. Meriden: T. Sendzimir, 2000.
- Folle, L.F. **Metodologia de medição do coeficiente de atrito em estampagem e avaliação da influência da lubrificação e condições superficiais via simulação numérica**. 2008. 65 p. dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.
- Guimarães, S. R. **Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para previsão de vida de eixos de mandris de bobinadeiras de laminação a frio submetidos a danos acumulados por fadiga**. 2009. 126 p. dissertação de mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.
- Guimarães, S. R. **Avaliação das barras T do segmento com mordente do mandril do LB1**. Timóteo: ArcelorMittal Inox Brasil, 2009. (Relatório técnico, RT 38/074/2009).
- Hitachi. **Instruction Manual for ZR 21 BB-44 Sendzimir cold mill**. 1975
- Johnson, K.L. **Contacts Mechanics**. 1 ed. New York: Cambridge University Press, 1985. 452p.
- Mannesmann Demag. **Instruction Manual for ZR 21 BB-63 Sendzimir reversing cold strip mill**. 1980.
- Marciniak, Z.; Duncan, J.L; Hu, S.J. **Mechanics of sheet metal forming**, 2 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 211p.
- Neto, C.V. **Simulação numérica da laminação a frio no laminador Sendzimir número 2 da Acesita**. 2006. 86 p. dissertação de mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.
- Norton R.L. **Projeto de Máquinas**, 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. 931p.
- Reed-Hill, R. E. **Princípios de Metalurgia Física**, 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 774p.
- Roberts, W.L. **Cold Rolling of Steel**. 1 ed. New York: Marcel Dekker, 1978. 799p.

Saha, P.K.; Wilson, W.R.D.; Timsit, R.S. **Influence of surface topography on the frictional characteristics of 3104 aluminum alloy sheet.** *Wear*, v.197, p. 123-129, 1996.

Sefton, H. **A friction sensor for a sheet metal forming simulator.** 2000. dissertação de mestrado – Queen’s University Kingston. Ontário, 2000.

Swift, L.D. **Plastic bending under tension.** *Engineering*, v.166, p. 333-359, 1948.

T. Sendzimir, Inc. **Reverse pyramid winder mandrels.** disponível em: <http://sendzimir.com>. Acessado em 15 de Set. 2010.

Turley, J.W. **Consulta técnica.** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: [sergiorolla@acesita.com.br](mailto:sergiorolla@acesita.com.br) em 30 de Jan. 2006.

Turley, J.W. **Sendzimir controlled collapse winder.** *Iron and Steel Engineer*, v. 51, n 42, 1974.

Vallance, D.W., Matlock, D.K. **Application of the Bending-under-Tension friction test to coated sheet steels.** *Journal of Materials Engineering and Performance*, v.1, n.5, p. 685-694, 1992.

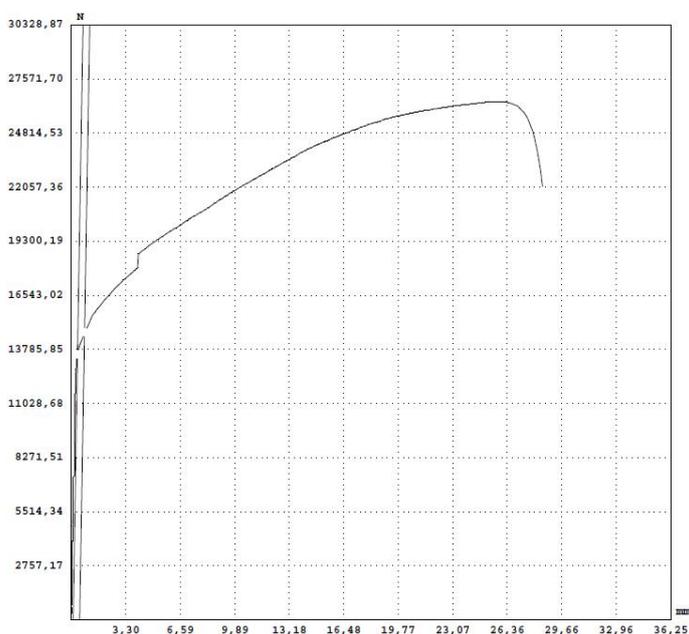
Wilson, W.R.W.; Malkani, H.G; Saha, P.K. **Boundary friction measurements using a new sheet metal forming simulator.** *Transactions of NAMRI/SME*, p. 37-42, 1991.

## ANEXO A

## A.1 Ensaio de tração da tira



ENSAIO: 00025227 DATA: 23/01/2010 HORA: 21:51:16  
 NORMA: ASTM 304 IDENTIFICAÇÃO: ASTM 304 3,0MM - SOLIC. 02/10  
 COMPRIMENTO DO C.P.: 50 mm VELOCIDADE DE ENSAIO 1: 10,00 mm/min  
 VEL. 2 A PARTIR DA DEF: 1,0000mm TRABALHO REALIZADO : TRAÇÃO  
 PRÉ CARGA (1a. Amostra): 20,00 N OPERADOR:AC44112  
 CÉLULA DE CARGA: 10000 kgf  
 OBSERVAÇÃO:



AMOSTRA No.	IDENTIF. DA AMOSTRA	OBSERVAÇÃO AMOSTRA	ALONGAMENTO %	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIM. ESC. 1 0,20% MPa	LIM. ESC. 2 1,00% MPa	ÁREA TRANSVERSAL mm <sup>2</sup>	LARGURA mm	ESPESSURA mm
1	DUR:89HRB	CP 01 ATAIDE	50,60	709,16	363,47	393,76	37,234	12,370	3,010

## ANEXO B

## B.1 Levantamento de dados dos testes de tração direta

Tabela para levantamento de dados dos ensaios															
Amostra	Data	Hora	Equip.	Aço	Esp. [mm]	Larg. [mm]	Comp. [mm]	Dureza	Ra	Condição do Mordente	Condição de Lubrificação	Pressão do Mordente [bar]	Pressão do cilindro Hidra. [bar]	Arco de Contato	Observação
1	11/09/2010	15:23	LB1	304	2,85	50	410	89	3	novo	seco	10,5	100	direta	soltou do mordente, com rampa
2	11/09/2010	14:53	LB1	304	2,85	100	410	89	3	novo + 1	seco	10,5	100	direta	soltou do mordente, com rampa
3	11/09/2010	15:03	LB1	304	2,85	100	410	89	3	novo + 2	seco	10,5	100	direta	soltou do mordente, com rampa
4	11/09/2010	14:53	LB1	304	2,85	100	410	89	3	novo + 3	seco	16,5	100	direta	soltou do mordente, com rampa
5	11/09/2010	15:03	LB1	304	2,85	100	410	89	3	novo + 4	seco	16,5	100	direta	soltou do mordente, com rampa
6	11/09/2010	15:12	LB1	304	2,85	100	410	89	3	novo + 5	seco	16,5	100	direta	soltou do mordente, com rampa
7	11/09/2010	14:28	LB1	304	2,85	150	410	89	3	novo + 6	seco	23	100	direta	soltou do mordente, com rampa
8	11/09/2010	16:25	LB1	304	2,85	150	410	89	3	novo + 7	seco	23	100	direta	soltou do mordente, com rampa
9	11/09/2010	14:38	LB1	304	2,85	150	410	89	3	novo + 8	seco	23	100	direta	soltou do mordente, com rampa
10	12/06/2010	14:42	LB4	304	2,85	50	340	89	3	novo	Seco	13,5	100	Direta	soltou do mordente, com rampa
11	12/06/2010	14:49	LB4	304	2,85	50	340	89	3	novo + 1	Seco	13,5	100	Direta	soltou do mordente, com rampa
12	12/06/2010	14:54	LB4	304	2,85	50	340	89	3	novo + 2	Seco	13,5	100	Direta	soltou do mordente, com rampa
13	12/06/2010	15:20	LB4	304	2,85	100	340	89	3	novo + 3	Seco	19	100	Direta	soltou do mordente, com rampa
14	12/06/2010	12:57	LB4	304	2,85	100	340	89	3	novo + 4	Seco	19	100	Direta	soltou do mordente, com rampa
15	12/06/2010	15:33	LB4	304	2,85	100	340	89	3	novo + 5	Seco	19	100	Direta	soltou do mordente, com rampa
16	12/06/2010	15:55	LB4	304	2,85	150	340	89	3	novo + 6	Seco	24,5	100	Direta	soltou do mordente, com rampa
17	15/06/2010	14:06	LB4	304	2,85	150	340	89	3	novo + 7	Seco	24,5	100	Direta	soltou do mordente, com rampa
18	15/06/2010	14:10	LB4	304	2,85	150	340	89	3	novo + 8	Seco	24,5	100	Direta	soltou do mordente, com rampa
19	12/06/2010	17:49	LB3	304	2,85	50	340	89	3	novo	Seco	16,5	100	direta	soltou do mordente, com rampa
20	12/06/2010	17:49	LB3	304	2,85	50	340	89	3	novo + 1	Seco	16,5	100	direta	soltou do mordente, com rampa
21	12/06/2010	17:49	LB3	304	2,85	50	340	89	3	novo + 2	Seco	16,5	100	direta	soltou do mordente, com rampa
22	12/06/2010	17:43	LB3	304	2,85	100	340	89	3	novo + 3	Seco	22	100	direta	soltou do mordente, com rampa
23	12/06/2010	17:54	LB3	304	2,85	100	340	89	3	novo + 4	Seco	22	100	direta	soltou do mordente, com rampa
24	12/06/2010	18:00	LB3	304	2,85	100	340	89	3	novo + 5	Seco	22	100	direta	soltou do mordente, com rampa
25	12/06/2010	17:36	LB3	304	2,85	150	340	89	3	novo + 6	Seco	27	100	direta	soltou do mordente, com rampa
26	12/06/2010	17:36	LB3	304	2,85	150	340	89	3	novo + 7	Seco	27	100	direta	soltou do mordente, com rampa
27	12/06/2010	17:36	LB3	304	2,85	150	340	89	3	novo + 8	Seco	27	100	direta	soltou do mordente, com rampa

## ANEXO C

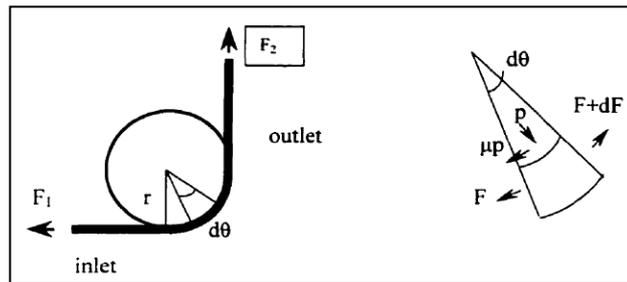
## C.1 Levantamento de dados dos testes de tração com arco de contato

Tabela para levantamento de dados dos ensaios															
Amostra	Data	Hora	Equip.	Aço	Esp. [mm]	Long. [mm]	Comp. [mm]	Dureza	Ra	Condição do Mordente	Condição de Lubrificação	Pressão do Mordente [bar]	Pressão do cilindro hiera. [bar]	Arco de Contato	Observação
28	21/08/2010	16:57	LB1	304	2,85	100	440	89	3	novo+9	seco	16,5	100	plana	Soltou com rampa. Mola 4,5 bar.
29	21/08/2010	17:02	LB1	304	2,85	100	440	89	3	novo+10	seco	16,5	100	plana	Soltou com rampa. Mola 4,5 bar.
30	21/08/2010	17:09	LB1	304	2,85	100	440	89	3	novo+11	seco	16,5	100	plana	Soltou com rampa. Mola 4,5 bar.
31	21/08/2010	16:31	LB1	304	2,85	100	930	89	3	novo+12	seco	16,5	100	90°	Soltou com rampa. Mola 4,5 bar.
32	21/08/2010	16:35	LB1	304	2,85	100	930	89	3	novo+13	seco	16,5	100	90°	Soltou com rampa. Mola 4,5 bar.
33	21/08/2010	16:39	LB1	304	2,85	100	930	89	3	novo+14	seco	16,5	100	90°	Soltou com rampa. Mola 4,5 bar.
34	21/08/2010	15:24	LB1	304	2,85	100	1450	89	3	novo+15	seco	16,5	100	180°	Soltou com rampa. Mola 4,5 bar.
35	21/08/2010	15:30	LB1	304	2,85	100	1450	89	3	novo+16	seco	16,5	100	180°	Soltou com rampa. Mola 4,5 bar.
36	21/08/2010	15:40	LB1	304	2,85	100	1450	89	3	novo+17	seco	16,5	100	180°	Soltou com rampa. Mola 4,5 bar.
37	21/08/2010	13:59	LB1	304	2,85	100	1850	89	3	novo+18	seco	16,5	100	270°	Soltou com rampa. Mola 4,5 bar.
38	21/08/2010	14:36	LB1	304	2,85	100	1850	89	3	novo+19	seco	16,5	100	270°	Soltou com rampa. Mola 4,5 bar.
39	21/08/2010	14:45	LB1	304	2,85	100	1850	89	3	novo+20	seco	16,5	100	270°	Soltou com rampa. Mola 4,5 bar.
40	21/08/2010	19:13	LB1	304	2,85	100	2080	89	3	novo+21	seco	16,5	100	315°	Travou, rampa, acionado manual até soltar. Mola 4,5 bar.
41	21/08/2010	09:49	LB1	304	2,85	100	2080	89	3	novo+22	seco	16,5	100	315°	Travou, rampa, acionado manual até soltar. Mola 4,5 bar.
42	21/08/2010	09:58	LB1	304	2,85	100	2080	89	3	novo+23	seco	16,5	100	315°	Travou, rampa, acionado manual até soltar. Mola 4,5 bar.
43	07/09/2010	08:15	LB4	304	2,85	100	440	89	3	novo+9	Seco	19	100	plana	10_09_2010_08_15_100 mm_seco_plana_LB4_rampa_soltou
44	07/09/2010	08:25	LB4	304	2,85	100	440	89	3	novo+10	Seco	19	100	plana	10_09_2010_08_25_100 mm_seco_plana_LB4_rampa_soltou
45	07/09/2010	08:40	LB4	304	2,85	100	440	89	3	novo+11	Seco	19	100	plana	10_09_2010_08_40_100 mm_seco_plana_LB4_rampa_soltou
46	07/09/2010	08:47	LB4	304	2,85	100	940	89	3	novo+12	Seco	19	100	90	10_09_2010_08_47_100 mm_seco_plana_LB4_rampa_soltou
47	07/09/2010	09:00	LB4	304	2,85	100	940	89	3	novo+13	Seco	19	100	90	10_09_2010_09_00_100 mm_seco_plana_LB4_rampa_soltou
48	07/09/2010	09:35	LB4	304	2,85	100	940	89	3	novo+14	Seco	19	100	90	10_09_2010_09_35_100 mm_seco_plana_LB4_rampa_soltou
49	07/09/2010	09:45	LB4	304	2,85	100	1380	89	3	novo+15	Seco	19	100	180	10_09_2010_09_45_100 mm_seco_plana_LB4_rampa_soltou
50	07/09/2010	10:15	LB4	304	2,85	100	1380	89	3	novo+16	Seco	19	100	180	10_09_2010_10_15_100 mm_seco_plana_LB4_rampa_soltou
51	07/09/2010	10:25	LB4	304	2,85	100	1380	89	3	novo+17	Seco	19	100	180	10_09_2010_10_25_100 mm_seco_plana_LB4_rampa_soltou
52	07/09/2010	10:40	LB4	304	2,85	100	1840	89	3	novo+18	Seco	19	100	270	10_09_2010_10_40_100 mm_seco_plana_LB4_rampa_soltou
53	07/09/2010	10:55	LB4	304	2,85	100	1840	89	3	novo+19	Seco	19	100	270	10_09_2010_10_55_100 mm_seco_plana_LB4_rampa_soltou
54	07/09/2010	11:15	LB4	304	2,85	100	1840	89	3	novo+20	Seco	19	100	270	10_09_2010_11_15_100 mm_seco_plana_LB4_rampa_soltou
55	07/09/2010	11:27	LB4	304	2,85	100	2100	89	3	novo+21	Seco	19	100	315	10_09_2010_11_27_100 mm_seco_plana_LB4_rampa_soltou
56	07/09/2010	11:43	LB4	304	2,85	100	2100	89	3	novo+22	Seco	19	100	315	10_09_2010_11_43_100 mm_seco_plana_LB4_rampa_soltou
57	07/09/2010	11:57	LB4	304	2,85	100	2100	89	3	novo+23	Seco	19	100	315	10_09_2010_11_57_100 mm_seco_plana_LB4_rampa_soltou

## ANEXO D

### D.1 Dedução da equação 2.2

A formulação apresentada por Saha; Wilson; Timsit (1996) para determinação do atrito encontra-se abaixo.



Com base no diagrama apresentado na figura acima tem-se:

$p$	pressão média de contato	$r$	raio do pino
$w$	largura da tira	$\theta$	ângulo de contato
$\mu$	atrito	$F$	forças aplicadas

Para o equilíbrio na direção radial:

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

Negligenciando os diferenciais de segunda ordem com o seno de um pequeno ângulo sendo igual a um ângulo muito pequeno, a equação acima se reduz a:

$$p = \frac{F}{rw}$$

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

$$p = \frac{F_2 + F_1}{2rw}$$

Para o equilíbrio na direção tangencial:

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

$$dF = \mu prwd\theta$$

Substituindo  $p$ :

$$dF = \mu \frac{F_2 + F_1}{2} d\theta$$

Integrando:

$$F_2 - F_1 = \mu \frac{F_2 + F_1}{2} \theta$$

Finalmente o coeficiente de atrito  $\mu$  é obtido.

$$\mu = \frac{2(F_2 - F_1)}{\theta(F_2 + F_1)}$$

Mas a diferença entre  $F_2$  e  $F_1$  é devida a força de atrito e a força necessária flexão da tira sobre o pino. Modificando a equação acima levando em conta a força de flexão tem-se:

$$\mu = \frac{2(F_2 - F_1 - FB)}{\theta(F_2 + F_1)}$$