

# ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE OPERACIONAL DAS CADEIRAS DO LTQ<sup>1</sup>

Pedro S. S. Vallim<sup>2</sup>  
Aguinaldo de Almeida<sup>3</sup>  
Nelson Yasuo Yamanaka<sup>4</sup>  
Daniel Esteves<sup>5</sup>  
Heli Lacerda Gomes<sup>6</sup>

## Resumo

A estabilidade operacional das cadeiras de Laminadores de Tiras a Quente (LTQ's) é constantemente buscada pelas equipes que operam e fornecem suporte técnico de manutenção e de processo ao laminador. De suma importância para eficiência do equipamento e para a qualidade dos produtos obtidos, a estabilidade operacional tem um conceito amplo, sendo porém sensível a detalhes sutis como por exemplo o da rigidez do conjunto cadeira – mancais – cilindros, intensidade de variação da força total e diferencial, e grau de cruzamento de cilindros. Este trabalho tem por objetivo mostrar alguns testes práticos de avaliação de indicadores da estabilidade do laminador, através de seus métodos de execução, relatórios, padrões de interpretação, e exemplos de relacionamentos dos resultados dos ensaios com alguns itens relevantes para a estabilidade e performance operacional do LTQ.

**Palavras-chave:** Cruzamento de cilindros; Excentricidade de cilindros; Força diferencial; Rigidez de cadeiras.

## EVALUATION ASSAYS OF THE OPERATIONAL STABILITY OF THE HSM STANDS

### Abstract

The operational stability of the stands of Hot Strip Mill (HSM) is always searched by the people who operates and supply technical maintenance and process support to the mill. It is of greater importance to the equipment efficiency and to the quality of the gathered products and it has a wide concept, but related to the subtle details as the stiffness of the stand – bearing – rolls ensemble. This paper has the objective to show some practical tests for evaluation of the mill stability indicators, by-across their execution method, reports, interpretation pattern, and examples of the connections of the assays results with some relevant item for operational stability and performance of the HSM.

**Key words:** Roll crossing; Roll eccentricity; Differential rolling force; Stand stiffness.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 44º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 16 a 19 de outubro de 2007, Campos do Jordão – SP, Brasil.

<sup>2</sup> Membro da ABM. Engenheiro Mecânico, CQE., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: [pedrovallin@cosipa.com.br](mailto:pedrovallin@cosipa.com.br)

<sup>3</sup> Engenheiro Elétrico, Analista de Manutenção da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, COSIPA, E-Mail :: [aguinaldo@cosipa.com.br](mailto:aguinaldo@cosipa.com.br)

<sup>4</sup> Engenheiro Elétrico, MBA, Analista de Manutenção da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, COSIPA, E-Mail: [yamanaka@cosipa.com.br](mailto:yamanaka@cosipa.com.br)

<sup>5</sup> Engenheiro Elétrico, Analista de Manutenção da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, COSIPA, E-Mail: [esteves@cosipa.com.br](mailto:esteves@cosipa.com.br)

<sup>6</sup> Técnico Metalúrgico, Assistente de Operação da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, COSIPA, E-Mail: [heligomes@cosipa.com.br](mailto:heligomes@cosipa.com.br)

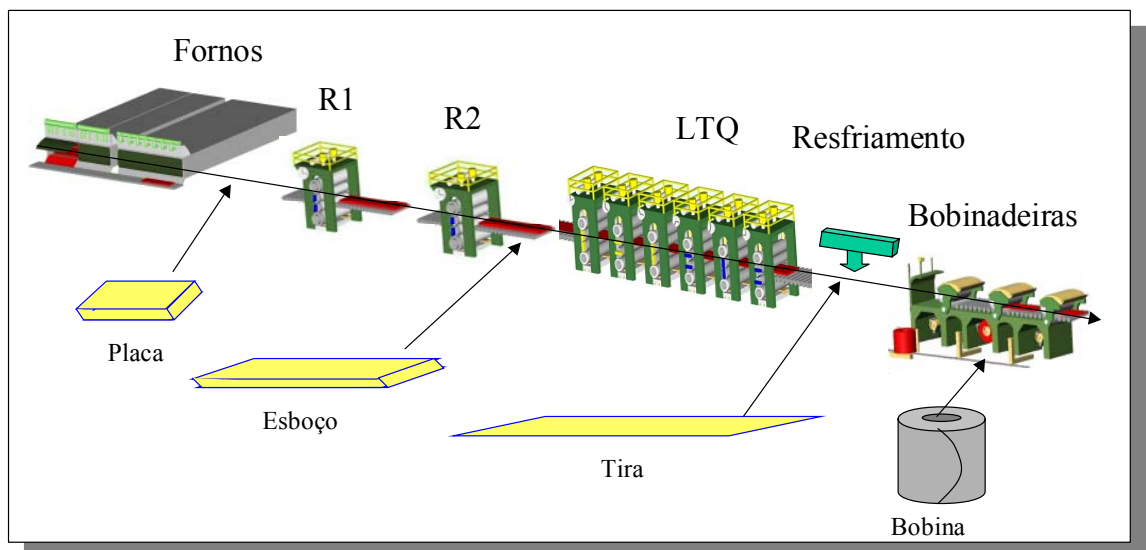
## 1 INTRODUÇÃO

Linhas de produção de tiras a quente (*Hot Strip Mill*) produzem bobinas destinadas tanto a produtos finais, para clientes externos, como também produtos destinados à processamento adicionais em linhas de laminação de acabamento (*Hot Skin Pass Mill*) ou de laminação à frio (*Cold Mill*), exercendo nesse caso o papel de matéria prima.

Laminadores de Tiras a Quente (LTQ's) são equipamentos que reduzem a espessura de esboços oriundos de placas reaquescidas em fornos, e laminadas em laminadores esboçadores (*Roughing Mills*), também chamados desbastadores.

A tira laminada a quente produzida no LTQ é então resfriada por um equipamento de resfriamento de tiras durante sua transferência para as bobinadeiras, que literalmente enrolam a tira para o formato de bobinas.

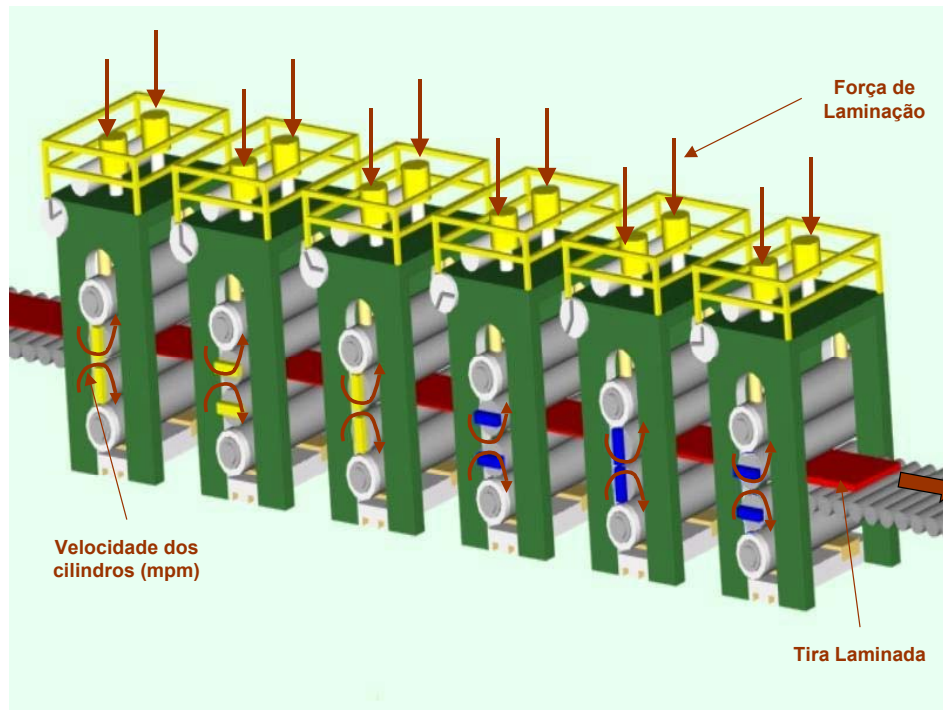
A Figura 1 abaixo mostra de forma simplificada o fluxo de equipamentos principais da linha de tiras a quente da COSIPA: 3 fornos de reaquecimento, 2 laminadores quádruplo reversíveis de desbaste ou esboçamento, 1 Laminador de Tiras a Quente de 6 cadeiras, seguido de um sistema de resfriamento de tiras e finalmente 3 bobinadeiras.



**Figura 1.** Fluxo esquemático dos principais equipamentos da Linha de Tiras a Quente da COSIPA.

De suma importância para eficiência da linha e para a qualidade dos produtos obtidos, estabilidade operacional das cadeiras do LTQ é constantemente buscada pelas equipes que operam e fornecem suporte técnico de manutenção e de processo ao laminador. A relevância é maior no caso da Cosipa, já que ela opera um LTQ com partida na década de 60, um dos poucos a dispor ainda de parafuso eletromecânico para posicionamento do gap, ou abertura entre cilindros, ao contrário de linhas mais modernas possuidoras de cápsulas hidráulicas para a mesma função.

A Figura 2 mostra o aspecto de um LTQ, de 6 cadeiras quádruas, ou seja com 2 pares de cilindros de trabalho trabalho e encosto, cada par correspondendo a um conjunto superior e inferior, respectivamente. Os cilindros de encosto, utilizados para se contrapor à flexão dos cilindros de trabalho, são apoiados em mancais de deslizamento, sendo os de trabalho apoiados em mancais de rolamento. Sobre os mancais de cilindros de encosto é exercida a força de laminação, em cada um dos lados da cadeira, ou seja lados operação e acionamento ou motor, que mantêm a necessária abertura ou gap de cilindros para a obtenção da espessura visada na tira. O acionamento da rotação dos cilindros é feita sobre os cilindros de trabalho, que efetivamente entram em contato com a tira laminada.



**Figura 2.** Laminador de Tiras a Quente de 6 cadeiras quádruas, contínuas, mostrando a posição aplicação da força de laminação nos lados operação de acionamento e a velocidade periférica dos cilindros.

O significado da estabilidade operacional das cadeiras do LTQ talvez seja respondido pelo pessoal que opera diretamente o laminador como sendo algo fundamental para a “boa” passagem da tira pelas cadeiras, definição que carece de precisão. Eventualmente a operação se “acostuma” com deficiências de estabilidade do equipamento, perdendo sua percepção, ao longo do tempo.

De fato, a estabilidade operacional do LTQ tem um conceito amplo, sendo porém sensível a detalhes sutis como por exemplo o da rigidez do conjunto cadeira – mancais – cilindros, intensidade de variação da força total e diferencial, e grau de cruzamento de cilindros.

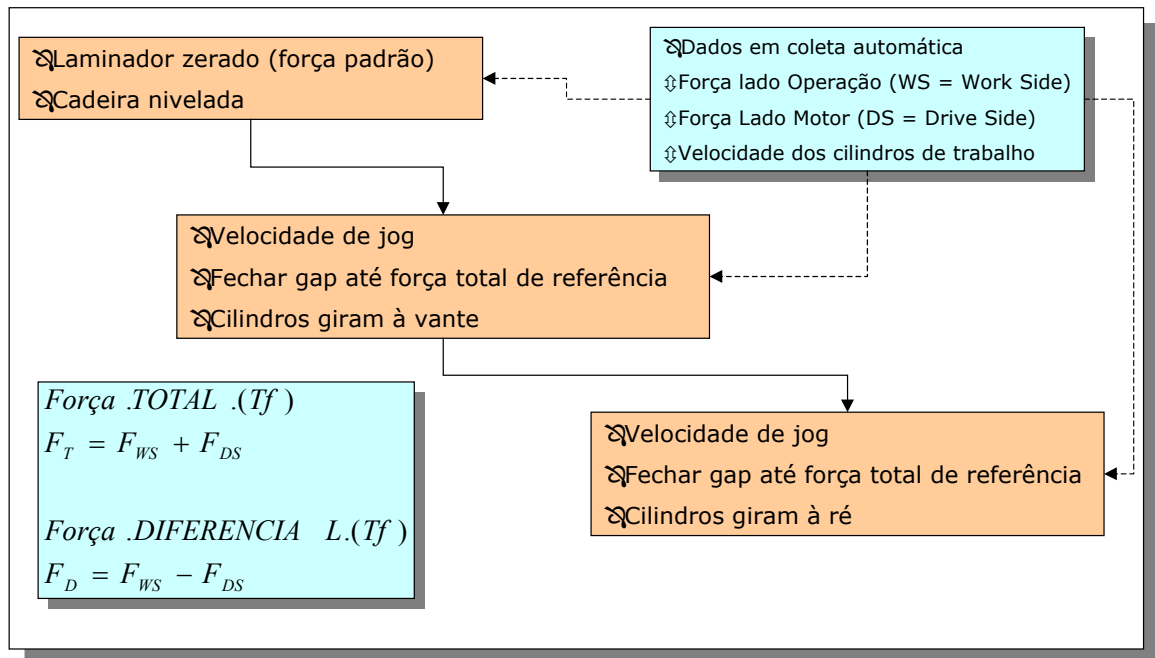
Este trabalho tem por objetivo mostrar alguns testes práticos de avaliação desses parâmetros, através de seus métodos de execução, relatórios de saída, padrões de interpretação, e exemplos de relacionamentos dos resultados dos ensaios com alguns itens relacionados com a estabilidade e performance operacional do LTQ.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Ensaio de Cruzamento de Cilindros

De forma ideal, os cilindros mantêm uma mesma direção axial ao seu eixo comum em laminadores. A ocorrência de cruzamento de cilindros acarreta problemas de forma, como má planicidade, curvatura da tira no sentido longitudinal (*camber*), e instabilidade na passagem da tira pelas cadeiras.

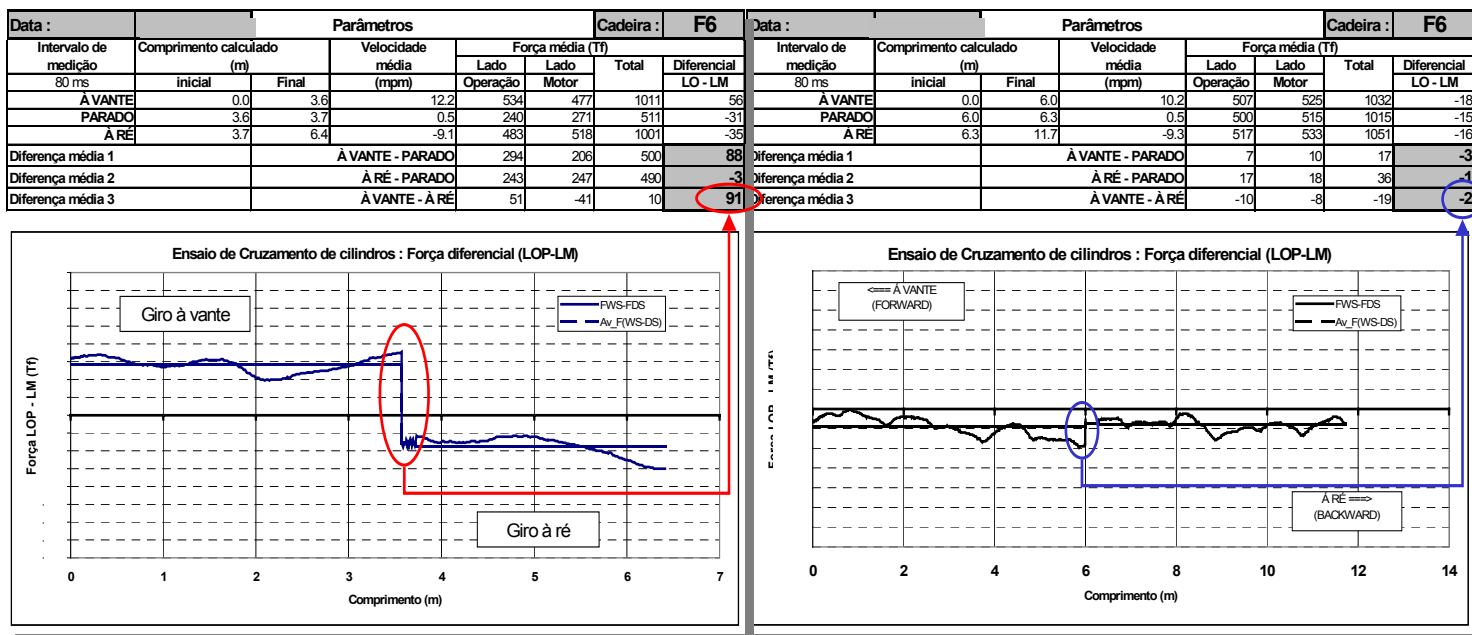
A Figura 3 sugere um método padronizado de execução e coleta de dados de um tipo de ensaio de avaliação indireta do grau de cruzamento pela medição da diferença da força diferencial, entre lados da cadeira, com a inversão do sentido da rotação dos cilindros de trabalho.



**Figura 3.** Método de realização e coleta de dados para o ensaio de cruzamento de cilindros e definição dos parâmetros importantes.

Esse tipo de ensaio tem a vantagem de indicar com boa precisão o fenômeno de cruzamento de cilindros, alertando quanto à necessidade de checar medidas de liner's da cadeira e mancais de cilindros de trabalho e encosto, bem verificar o estado de desgaste dos mesmos.

Um possível modelo de relatório de análise dos dados obtidos é sugerido a seguir na Figura 4, com a indicação de 2 ensaios distintos realizados na cadeira F6, sendo indicada diferença média da força diferencial à vante e ré, parâmetro indicador do grau de cruzamento.



**Figura 4.** Relatórios do ensaio de cruzamento de cilindros, indicando no 1º caso um alto grau de cruzamento (91 Tf), e um baixo nível de cruzamento no 2º caso (-2 Tf).

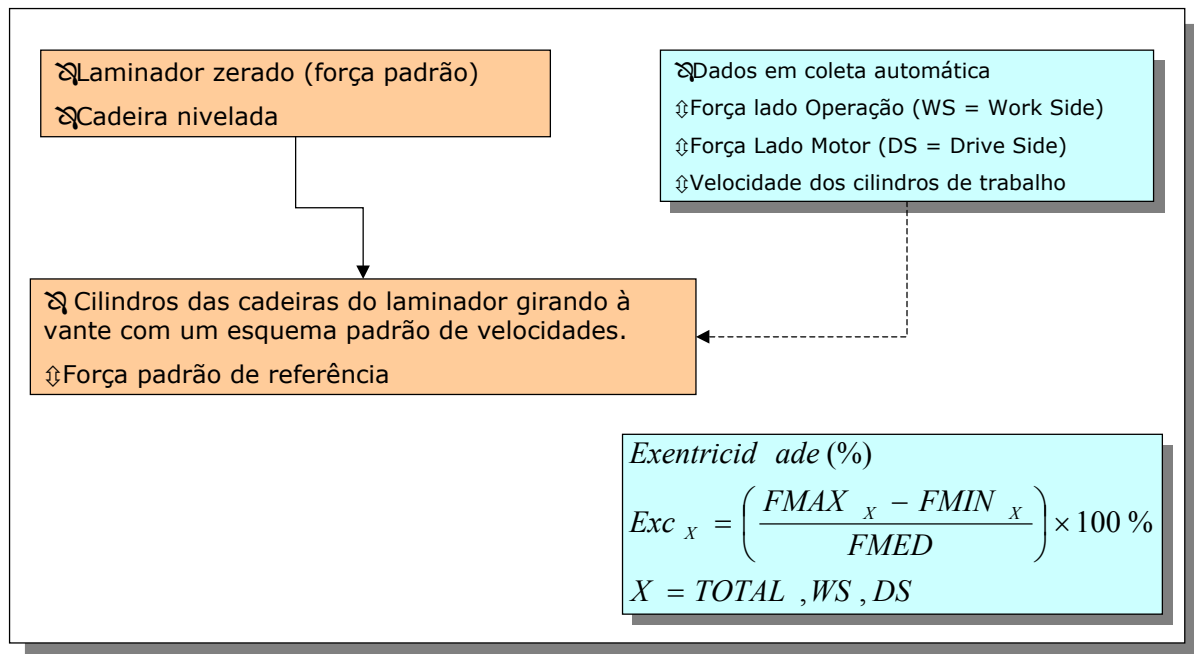
Com o parâmetro de cruzamento quantificado, podem ser elaborados adicionalmente gráficos de séries temporais com os resultados dos ensaios por cadeira para acompanhamento cronológico do problema, indicando quando deverá ser efetuada a manutenção antes que ocorra o agravamento do índice.

## 2.2 Ensaio de Excentricidade de Força

A cada giro dos cilindros de encosto, sob uma determinada força de laminação resultante de uma abertura (*gap*) de cilindros mantida constante, observa-se na prática uma variação dessa força. Esse padrão de variação da força repete-se a cada giro dos cilindros de encosto.

Entretanto, a amplitude total da variação dessa força em torno da média pode variar em um ciclo que abrange várias rotações dos cilindros de encosto. Nesse caso, essa variação adicional corresponde ao posicionamento defasado ou não das chavetas de fixação dos mancais de encosto superior e inferior, correspondendo à variação máxima de força à condição de ambas as chavetas terem posições coincidentes na zona de carga do mancal.

A Figura 5 mostra o método de execução do ensaio, os parâmetros importantes a serem registrados, e a definição adotada para a excentricidade de força.



**Figura 5.** Método de realização e coleta de dados para o ensaio de excentricidade de força e definição dos parâmetros importantes.

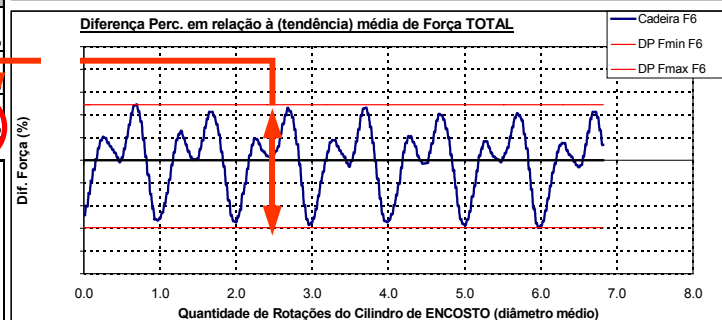
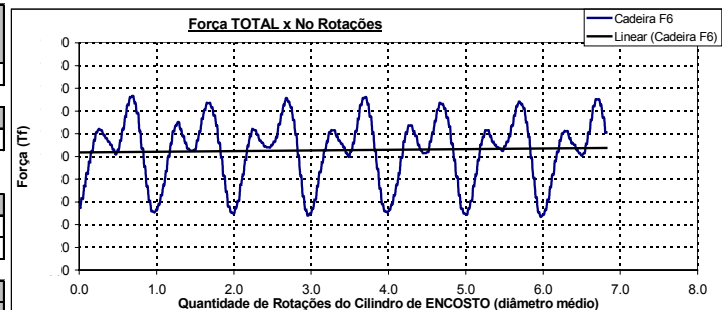
A Figura 6 exemplifica os relatórios de 2 casos de ensaios na cadeira F6, com resultados bem distintos de excentricidade de força.

<b>Cadeira F6</b>	Diâmetro médio de cilindros	Intervalo de medição
Data	T= 659.05 mm Erro = +0.01%	Velocidade CT's
	E= 1096.70 mm Erro = +0.06%	

Força média TOTAL	Força média LOP	Força média LMOT
1005 Tf	527 Tf	479 Tf
DP = 29 Tf	DP = 20 Tf	DP = 9 Tf

Excentricidade relativa TOTAL	Excentricidade relativa Lado OPERAÇÃO	Excentricidade relativa Lado MOTOR	
Negativa	Negativa	Negativa	-3.6%
Positiva	Positiva	Positiva	3.5%
Range Total	Range Total	Range Total	7.1%

Observações :

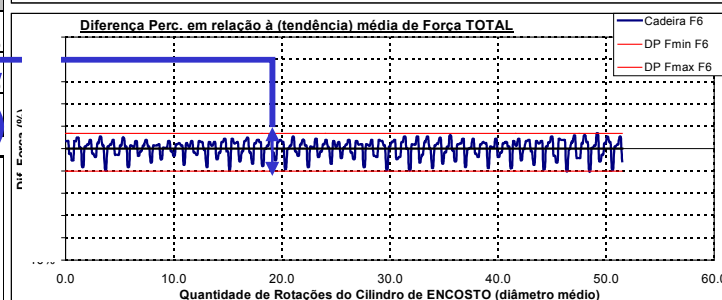
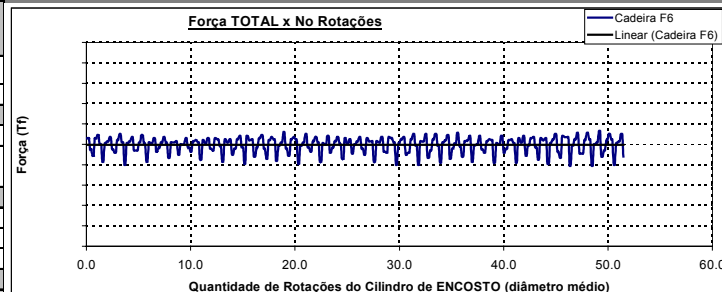


<b>Cadeira F6</b>	Diâmetro médio de cilindros	Intervalo de medição
Data	T= 665.45 mm -Erro = +0.02%	Velocidade CT's
	E= 1122.43 mm -Erro = +3.17%	

Força média TOTAL	Força média LOP	Força média LMOT
999 Tf	481 Tf	519 Tf
DP = 8 Tf	DP = 4 Tf	DP = 5 Tf

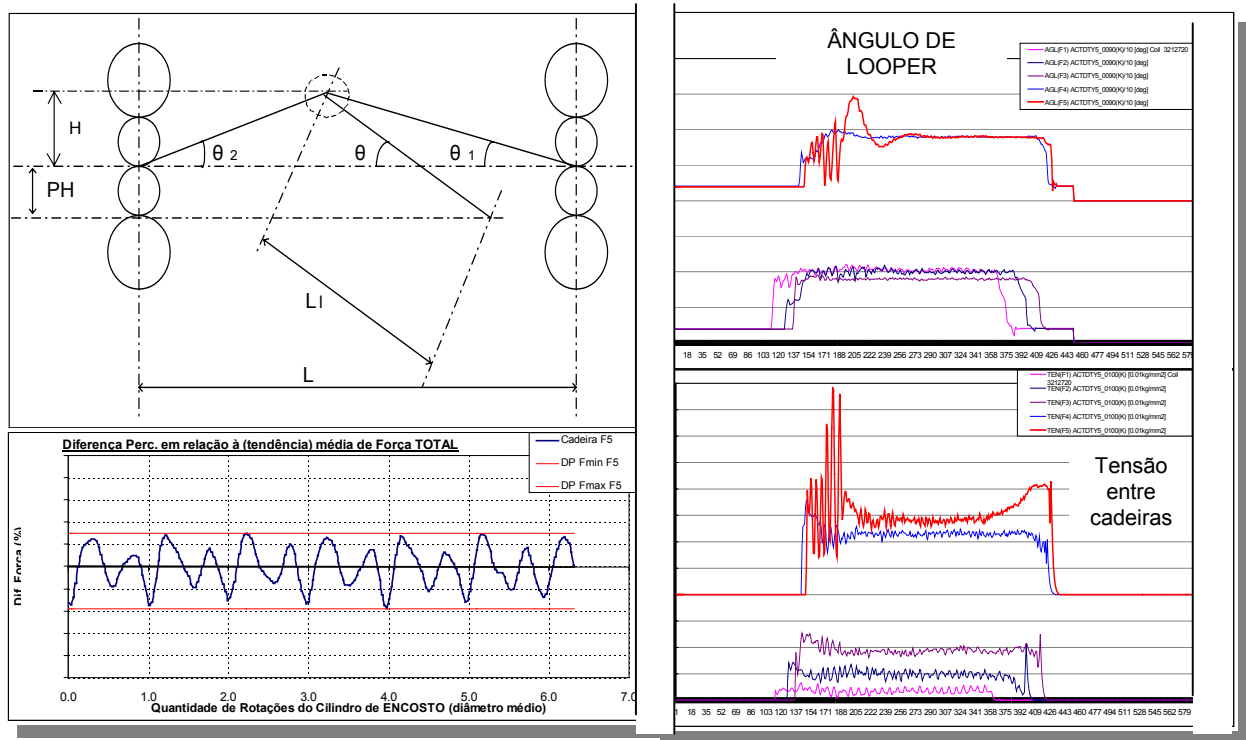
Excentricidade relativa TOTAL	Excentricidade relativa Lado OPERAÇÃO	Excentricidade relativa Lado MOTOR	
Negativa	Negativa	Negativa	-2.1%
Positiva	Positiva	Positiva	1.5%
Range Total	Range Total	Range Total	3.7%

Observações :



**Figura 6.** Relatórios do ensaio de excentricidade de força, indicando no 1º caso um alto grau de excentricidade (7.1%), e um baixo nível de excentricidade no 2º caso 3.7%).

A excessiva excentricidade de força pode vir a ser um fator de funcionamento irregular dos loopers entre cadeiras do LTQ, acarretando forte instabilidade do fluxo de massa e grande risco de sucata da tira, com conseqüente parada de produção da linha. A Figura 7 a seguir mostra um exemplo extremo desse tipo de caso, através dos gráficos de excentricidade, ângulo de looper e tensão unitária de tira entre cadeiras.



**Figura 7.** Exemplo de acentuada excentricidade de força causando vibração anormal do looper entre cadeiras, evidenciada pela oscilação incomum do ângulo de looper e grande variação da tensão unitária da tira entre cadeiras do LTQ.

O ensaio de excentricidade de força tem a vantagem de indicar com boa precisão o fenômeno de vibrações anormais de loopers, alertando quando à necessidade de verificar anormalidades nos componentes do conjunto de cilindros e mancais de encosto, como por exemplo bucha, luva e chaveta de fixação do mancal.

Ainda em casos de excentricidade elevada, o processo de zeragem (roll zeroing) da cadeira pode não ser completada, devido à alta variação de força, o que prejudica também a performance de espessura e largura da tira.

É altamente recomendável o acompanhamento periódico do valor de excentricidade de cada cadeira do LTQ, visando identificar de conjuntos específicos de mancais e cilindros de encosto que tenham relação com valores elevados do parâmetro, para se necessário trocar componentes de mancais e/ou corrigir a retificação de cilindros de forma a manter baixo o nível da excentricidade de força.

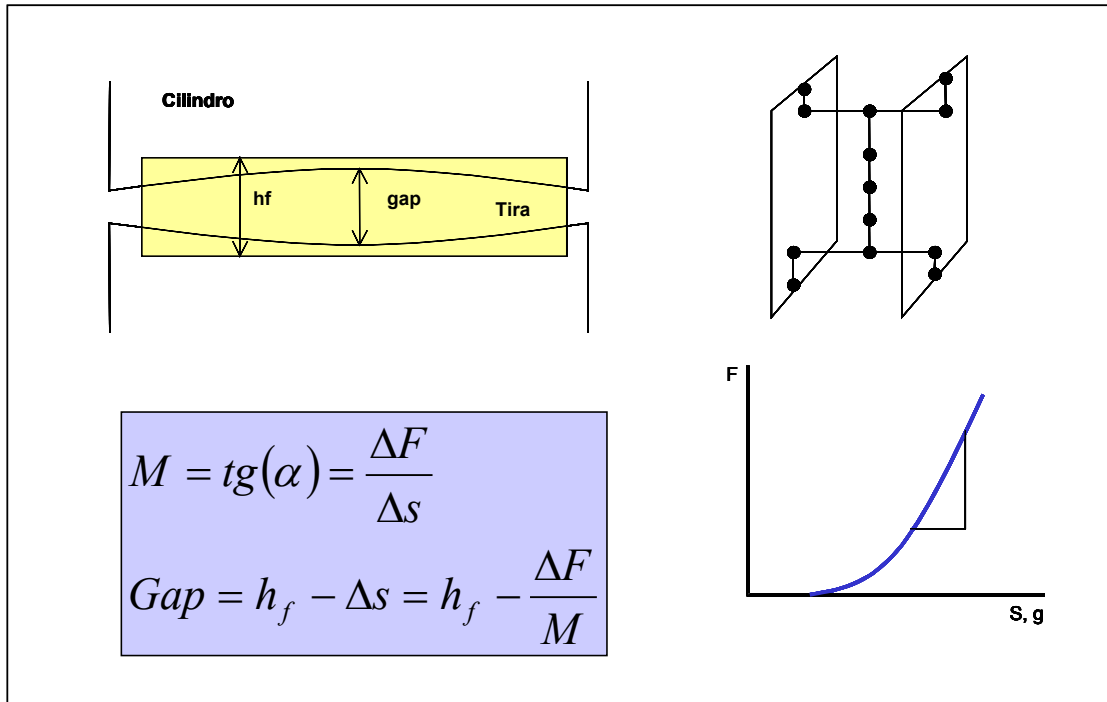
### 2.3 Ensaio de Rigidez e Força Diferencial

A estrutura da cadeira do laminador pode ser considerada como um conjunto de molas, cada uma delas correspondendo a um elemento da base e carcaça da cadeira, parafusos de posicionamento, mancais e cilindros de encosto e trabalho.

Analogamente ao caso de uma única mola, pode ser medida ou calculada uma constante de elasticidade da cadeira de laminação, que é o seu módulo de rigidez M (“mill spring”). De uma forma simplificada, sendo F a força aplicada,  $\Delta s$  = cedimento



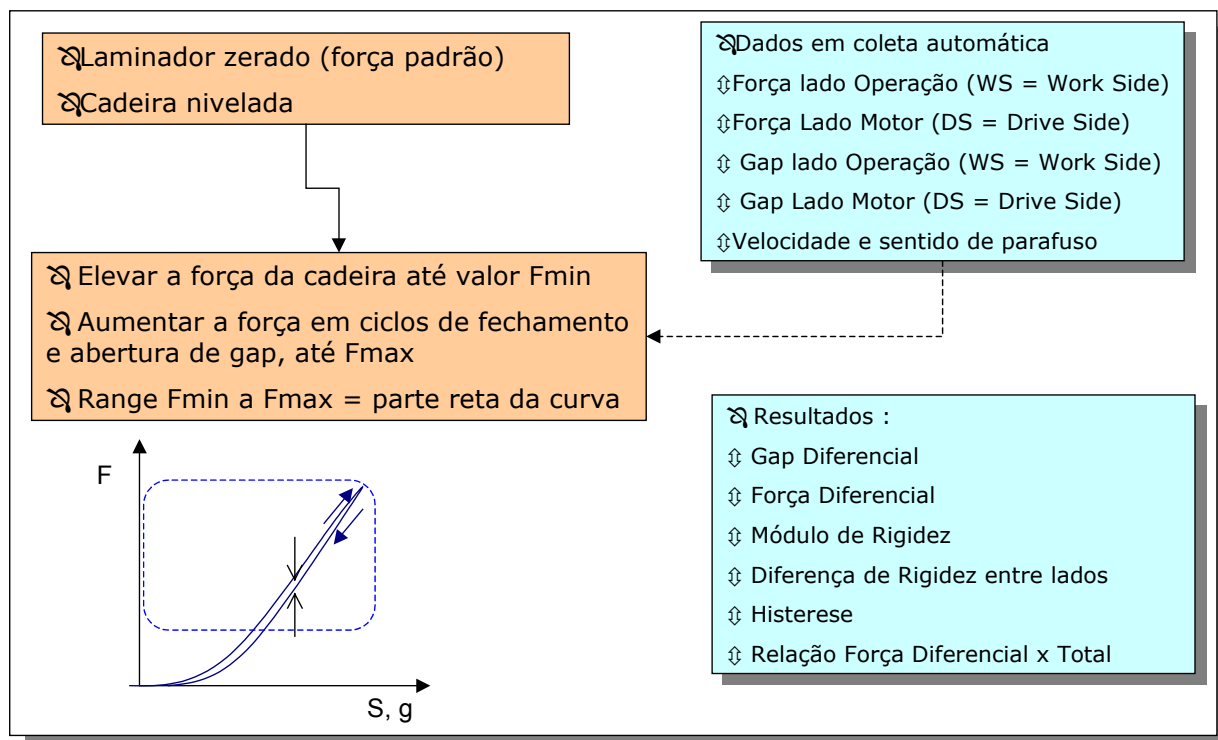
elástico do conjunto,  $h_f$  a espessura de saída da tira e  $gap$  a abertura entre cilindros, são bem conhecidas as relações mostradas na Figura 8 :



**Figura 8.** Conceito básico do módulo de rigidez da cadeia do laminador.  $\Delta F$  é variação da força de laminação,  $\Delta s$  = cedimento elástico do conjunto cilindros/mancais/cadeira,  $h_f$  a espessura de saída da tira e  $gap$  é a abertura ou luz entre cilindros. A curva  $F \times gap$  é a curva de rigidez da cadeia.

Na condição real da cadeira de laminação a curva de relacionamento entre a força aplicada  $F \times gap$  dos cilindros difere conforme ela seja obtida fechando o  $gap$  e aumentando a força aplicada, ou abrindo o  $gap$  e diminuindo essa força, o que resulta numa histerese da curva de rigidez. Quanto maior o módulo de rigidez e menor a histerese, mais rígida é a cadeira e mais uniforme é a resposta de sua rigidez à força de laminação aplicada.

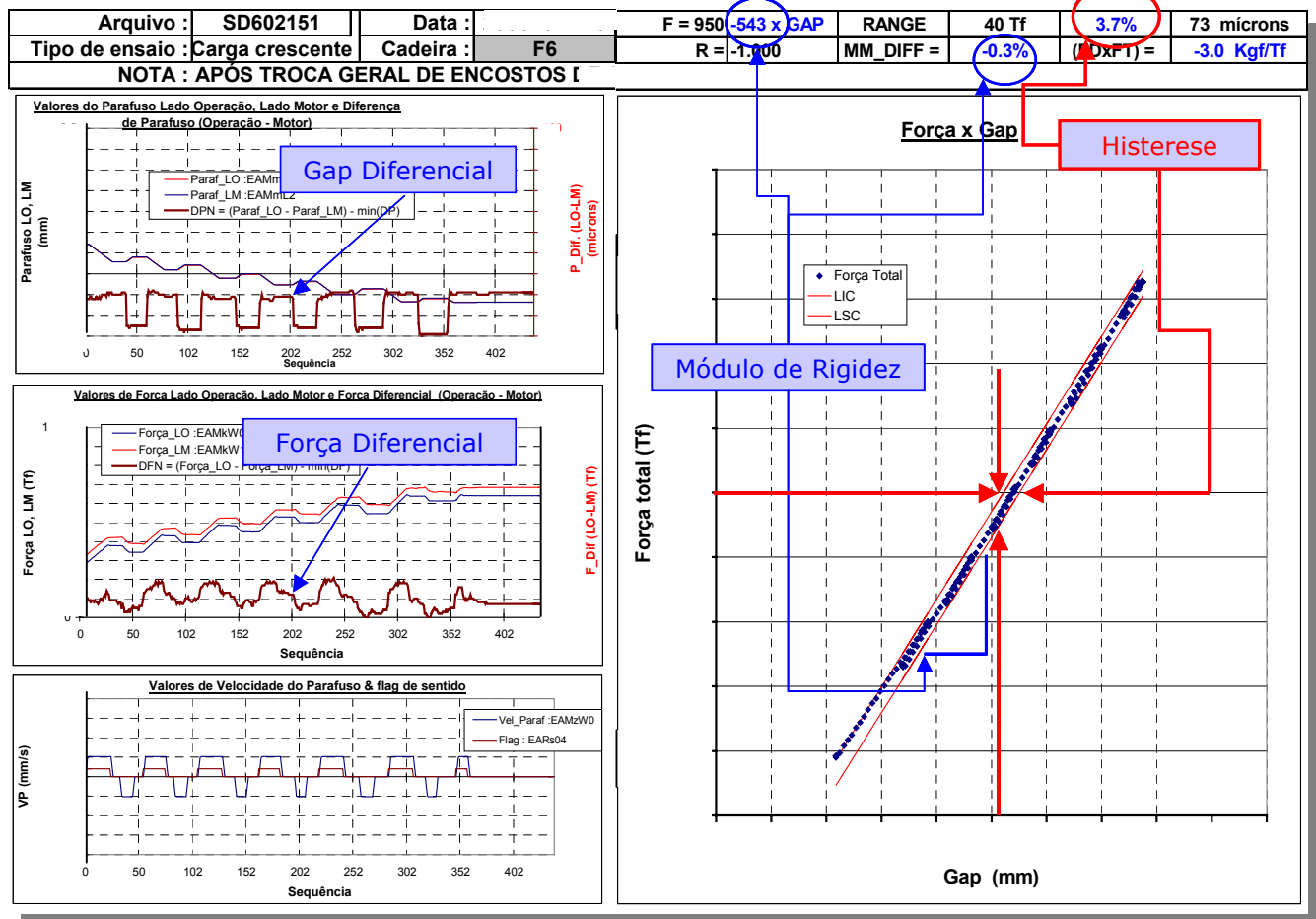
Na Figura 9 é mostrado um método de execução e definição dos parâmetros do ensaio de rigidez e força diferencial.



**Figura 9.** – Método de realização e coleta de dados para o ensaio de rigidez e força diferencial com a definição dos parâmetros importantes.

Diferentemente do caso clássico de curva de Mill Spring, neste visa-se a análise da parte reta da curva. Estende-se também com certa liberdade o conceito de histerese, que é o grau de diferença entre a curva de carregamento em relação à curva de descarregamento, já que ciclos curtos e alternados de abertura e fechamento do *gap* são impostos, incorporando também folgas e resistências de atrito da cadeira.

Um *lay-out* de relatório do ensaio é exibido na Figura 10, no qual a riqueza de informações pode ser percebida. A reta de rigidez mostrada é da força total x *gap* médio. Porém essa mesma reta pode ser obtida para cada um dos lados operação e motor da cadeira.

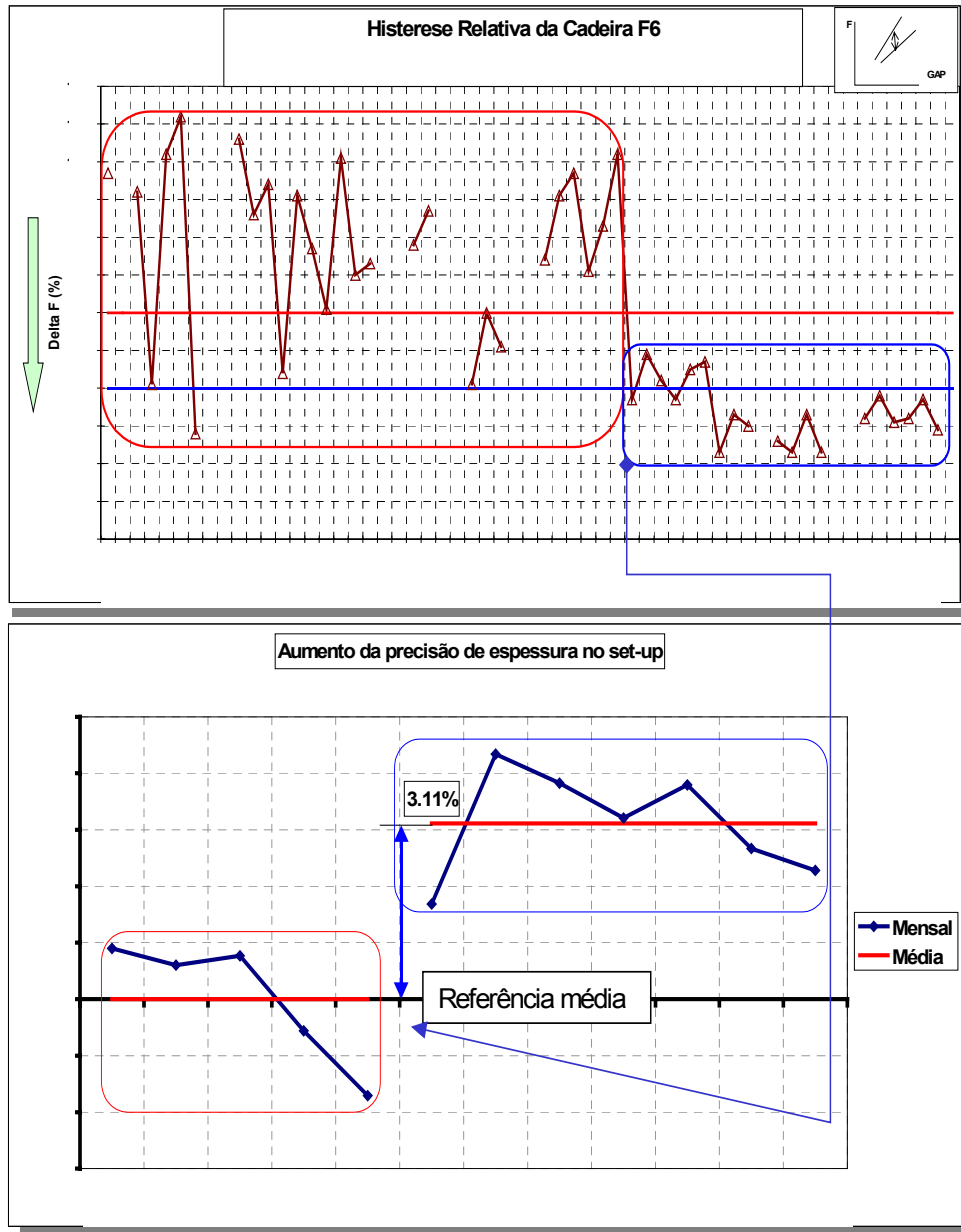


**Figura 10.** Exemplo do relatório do ensaio de rigidez e força diferencial de uma cadeira do LTQ. Curva de rigidez obtida com a força total x gap médio. São ressaltados ainda curvas de gap e força diferencial, e parâmetros como o módulo e a histerese relativa da reta de rigidez.

Novamente é importante a coleta e análise periódica dos resultados para produção de séries temporais que mostrem a resposta à ações de correção de componentes da cadeira.

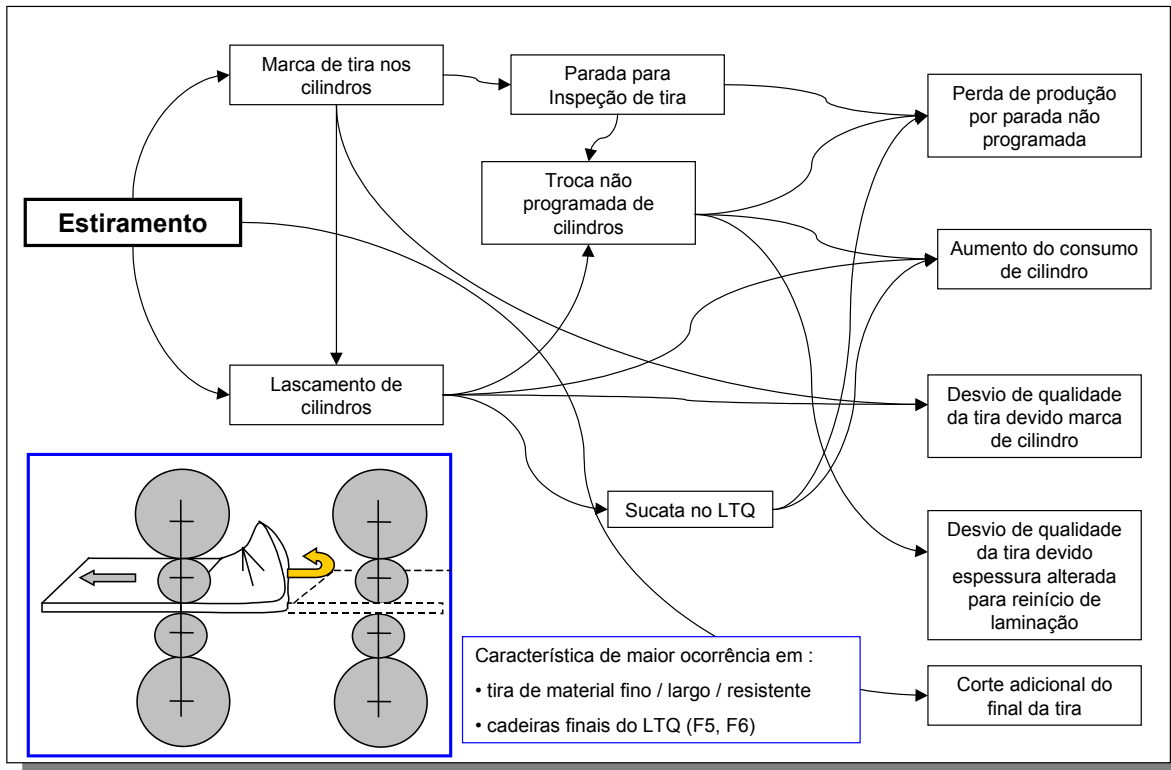
### 3 RESULTADOS

Na Figura 11 é exemplificado um caso de ajuste de da cadeira F6, resultando em expressiva redução da histerese relativa e aumento da precisão do desvio de espessura na ponta inicial da tira, devido à melhoria do posicionamento de *gap* previsto no cálculo do modelo de *set-up*.



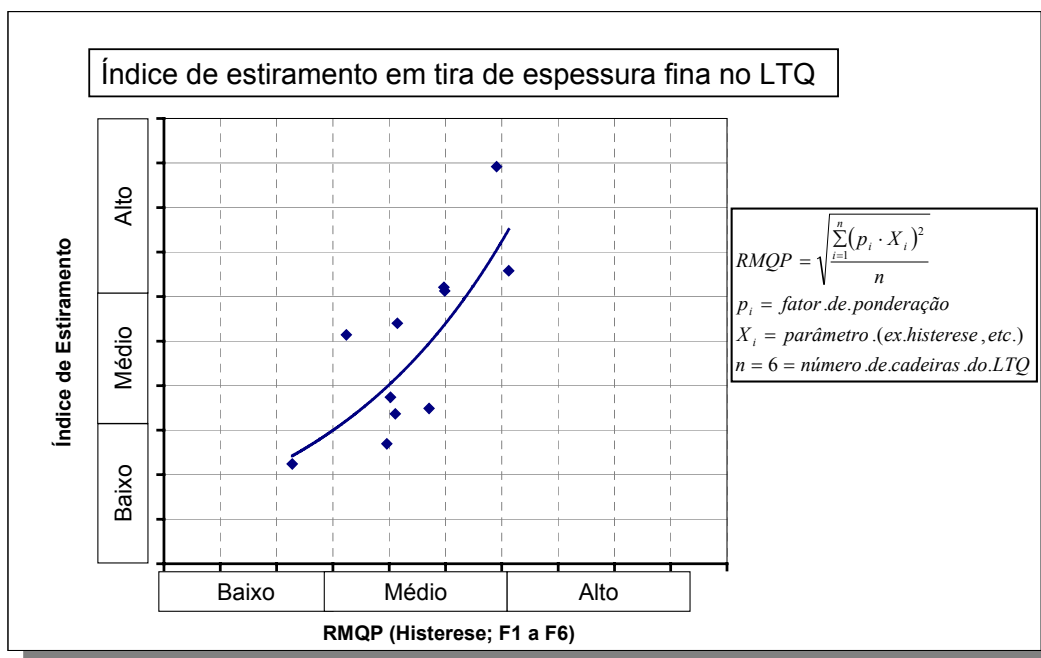
**Figura 11.** Série temporal do índice de histerese relativa da cadeira F6 mostrando diminuição de valor que resultou no aumento do acerto de precisão de espessura na região inicial de set-up da tira laminada no LTQ (+3.11%).

Os parâmetros do ensaio pode também ser usados na investigação de vários problemas de estabilidade no LTQ. Um exemplo interessante é a relação entre a histerese e o estiramento de tira no laminador. O estiramento é um impacto violento do final da tira sobre o cilindro de trabalho superior, causando o seu esgarçamento e marcando o cilindro. O conceito e efeitos danosos do estiramento são mostrados na Figura 12.



**Figura 12.** Conceito, características de ocorrência e inter-relacionamentos de alguns efeitos danosos causados pela ocorrência de estiramento do final da tira entre cadeiras finais do LTQ.

Embora as causas do estiramento de tira envolvam também a condição do material e parâmetros e de seu processamento no LTQ, como por exemplo o da temperatura de laminação, admite-se também a influência da rigidez das cadeiras do laminador. Considerando-se a raiz média quadrática ponderada do parâmetro de histerese relativa das cadeiras do LTQ, atribuindo-se maior influência das últimas cadeiras, percebe-se na figura 13 sua a influência no índice de ocorrência de estiramento em material fino, abaixo de 2.41 mm. A dispersão dos resultados deve-se à influência dos outros fatores anteriormente mencionados.



**Figura 13.** Influência da histerese relativa da rigidez das cadeiras do LTQ sobre o índice de ocorrência de estiramento em material fino.

#### 4 CONCLUSÕES

O conceito de estabilidade operacional das cadeiras do LTQ foi abordado do ponto de vista de alguns ensaios que definem dentro de um aspecto mais quantitativo as condições necessárias para que a influência do conjunto cadeira – mancais - cilindros seja de forma a não interferir de forma prejudicial no fluxo de massa e performance de qualidade do material.

Foram mostrados métodos de execução, parâmetros ou variáveis para coleta de dados e exemplos de relatórios dos ensaios de :

- Cruzamento de cilindros
- Excentricidade de força
- Rigidez e força diferencial

Foram ainda exibidos exemplos de algumas influências importantes dos parâmetros dos ensaios em alguns itens bastante relacionados com a estabilidade operacional das cadeiras, como o fluxo de massa, performance de espessura do material e índice de estiramento de tira no LTQ.

#### REFERÊNCIAS

- 1 TSELIKOV, A. I. ; NIKITIN G. S. ; ROKOTYAN, S. E. – “The Theory of Lengthwise Rolling” – MIR, 1962.
- 2 TSELIKOV, A. I. – “Stress and Strain in Metal Rolling” – MIR, 1981.
- 3 PLAUT, R. L. – “Laminação dos Aços – Tópicos Avançados” – ABM, 1987.