

FATORES QUE INFLUENCIAM A VARIAÇÃO DA MASSA LINEAR NA PRODUÇÃO DE ARAMES CA60*

Enrico Tosolini¹

Resumo

O controle da massa linear dos arames CA60 vem sendo tratado com máxima prioridade, devido ao constante esforço da indústria nacional de reduzir os custos e melhorar a eficiência de produção. O trabalho é um estudo teórico dos fatores físicos que influenciam na variação da massa linear. Para desenvolver a análise, o problema foi simplificado para reconduzi-lo a um problema linear de fácil análise e com parâmetros intuitivos para fácil aplicação dos conceitos nos problemas diários da produção.

Palavras-chave: Laminação a frio; Variação massa linear; Arames CA60; Variação do fio-máquina; Rigidez conjuntos de laminação; Lubrificantes na laminação a frio; Temperaturas de funcionamento; Dilatação arame; Dilatação anéis.

FACTORS AFFECTING DE VARIATION OF THE LINEAR MASS IN THE PRODUCTION OF COLD ROLLED REBAR WIRES

Abstract

The control of the linear mass has become a relevant issue, due to the constant aim to reduce costs and improve the efficiency of production of rebar products. The study makes a theoretic approach to the physical factors which influence the variation of the linear mass. To develop the analysis, the problem has been reduced to a simplified linear problem, whose parameters are well intuitive and easy applying on the everyday production situations.

Keywords: Cold rolling; Linear mass variation; CA 60 rebar wire; Wire rod variation; Rigidity of lamination equipment; Cold roll wire lubrication; Working temperatures; Wire dilatation; Lamination rolls dilatation.

¹ Eng., Diretor Industrial da Eurolls do Brasil LTDA, Itaquaquetuba, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais o assunto do controle da massa linear vem tendo importância no industrial de arames. Os arames laminados a frio do tipo CA 60, pela norma ABNT NBR 7480, admitem uma tolerância de até 6%, pra mais ou pra menos, da massa linear em respeito à bitola gravada no arame. A possibilidade de ter uma produção estável para ficar nos limites inferiores da norma sem sair dos parâmetros estabelecidos, pode proporcionar, para o produtor que tome estes cuidados, um importante diferencial na renda do produto final. Considerando um custo por quilo do fio máquina de aproximadamente 2 R\$, e uma produção mensal de aproximadamente 2.000 toneladas (uma máquina em três turnos), dá para entender como uma poupança de 3% no peso do produto utilizado, represente um ganho de R\$ 120.000.

Os objetivos deste trabalho são de fornecer uma base teórica, além de uma explicação prática, dos parâmetros que influenciam a variação da massa linear e dos cuidados a serem tomados para estabilizar a própria produção de laminados.

Como há uma escassez de literatura a respeito da laminação a frio de arames, foram utilizadas fórmulas emprestadas da trefilação, adaptadas para o processo da laminação à frio.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram considerados os seguintes fatores que influenciam a variação das bitolas durante a produção:

1. Variação do Fio-Máquina.
2. Rigidez do Conjunto de Laminação e resposta à variações dimensionais do material.
3. Lubrificação do arame.
4. Temperatura do arame.
5. Temperatura das ferramentas em contato com arame (anéis laminadores e suportes).

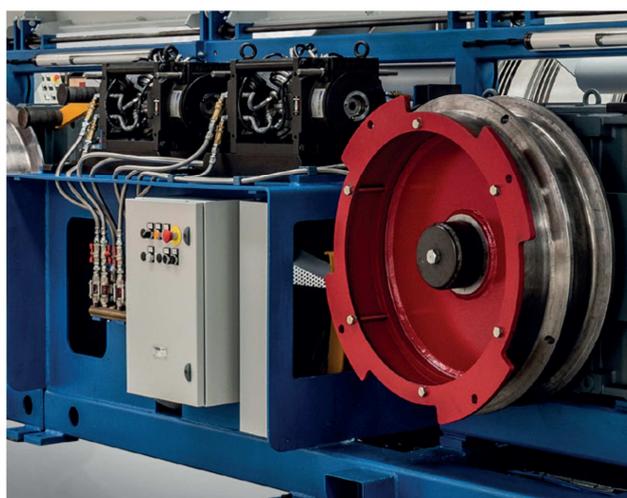


Figura 1. Bloco de laminação para CA60.

Cada um dos fatores elencados acima foi analisado de forma isolada e independente de outros fatores.

Não foram considerados os efeitos da combinação dos fatores acima mencionados.

Segue um resumo dos parâmetros físicos utilizados para as simulações.

Tabela 1. Parâmetros físicos

ELEMENTO	PAR.	DESCRICAO	UM	VALOR
Material	-	Fio Máquina SAE 1006 - Te 350 Mpa	-	-
Material	ρ_a	Peso Específico do Aço do Fio-Máquina	[g/cm ³]	7,85
Material	α_a	Coefficiente Dilatação Linear Aço	[°C ⁻¹]	11,0E-06
Fio-Máquina	A	Amplitude da variação do diâmetro (-+)	[mm]	0,10
Fio-Máquina	P	Periodo da variação	[m]	43,00
Cassete	K_c	Rigidez do Conjunto de Laminação	[N/mm]	3,00E+04
Lubrificante	μ_l	Coefficiente de fricção lubrificado HM-Aço (lubrificado)	[-]	0,05
Lubrificante	μ_d	Coefficiente de fricção lubrificado HM-Aço (seco)	[-]	0,15
Lubrificante	t_l	Tempo de zeramento das propriedades lubrificantes	[s]	18.000,00
Lubrificante	m_l	Coefficiente de aumento do coeficiente de fricção	[1/s]	-5,56E-06
Produção	P_a	Peso da bobina de CA60 final	[kg]	2.500,00
Produção	t_{pa}	Tempo para produção de Pa	[min]	21,50
Produção	t_{cb}	Tempo para troca da bobina de Pa	[min]	3,50
Produção	t_{tc}	Tempo Total do ciclo	[min]	25,00
Rolete	α_w	Coefficiente Dilatação Linear Carbetto T.	[°C ⁻¹]	6,0E-06

3.2 Variação do Fio-Máquina

Conforme indicado nos catálogos dos maiores produtores de aço, foi considerada uma tolerância dimensional $\pm 0,1$ mm para o fio-máquina.

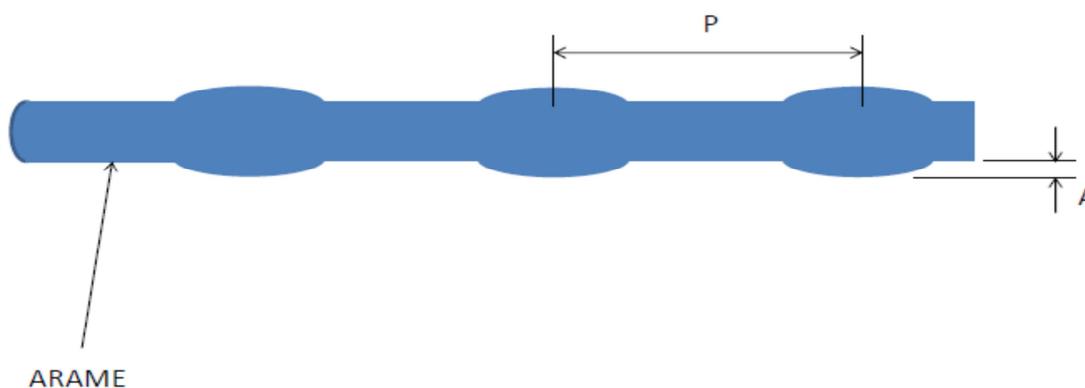


Figura 2. Fio-Máquina.

Foi considerada uma variação sinusoidal do diâmetro do fio-máquina com período da variação P e Amplitude da variação do diâmetro (-+) A conforme a Tabela 1 e velocidade de entrada no primeiro bloco $V_{01} = 7,5$ m/s.

Segue a fórmula utilizada:

$$D_0(t) = D_{0n} + A \sin(\omega t) \quad (1)$$

Na fórmula entendem-se:

$D_0(t)$: Diâmetro de entrada no Cassete em função do tempo

D_{0n} : Diâmetro Nominal Fio-Máquina

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

$$T = \frac{P}{V_{01}} \quad (3)$$

A variação da bitola do Fio-Máquina impacta diretamente nas forças de laminação e é contrastada pela rigidez do Conjunto de Laminação, conforme tratado no paragrafo seguinte.

3.3 Rigidez do Conjunto de Laminação e resposta à variações do Fio-Maquina

Entende-se como Conjunto de Laminação o conjunto formado por todos os componentes responsáveis para laminação, ou seja:

- Anéis de Laminação/Rolote
- Suportes/mancais/Rolamentos
- Pino do Suporte
- Corpo do Cassete de Laminação.

Todos estes componentes, montados com as respectivas folgas e constantes elásticas, formam um conjunto elástico que será considerado como único para fins da nossa análise.

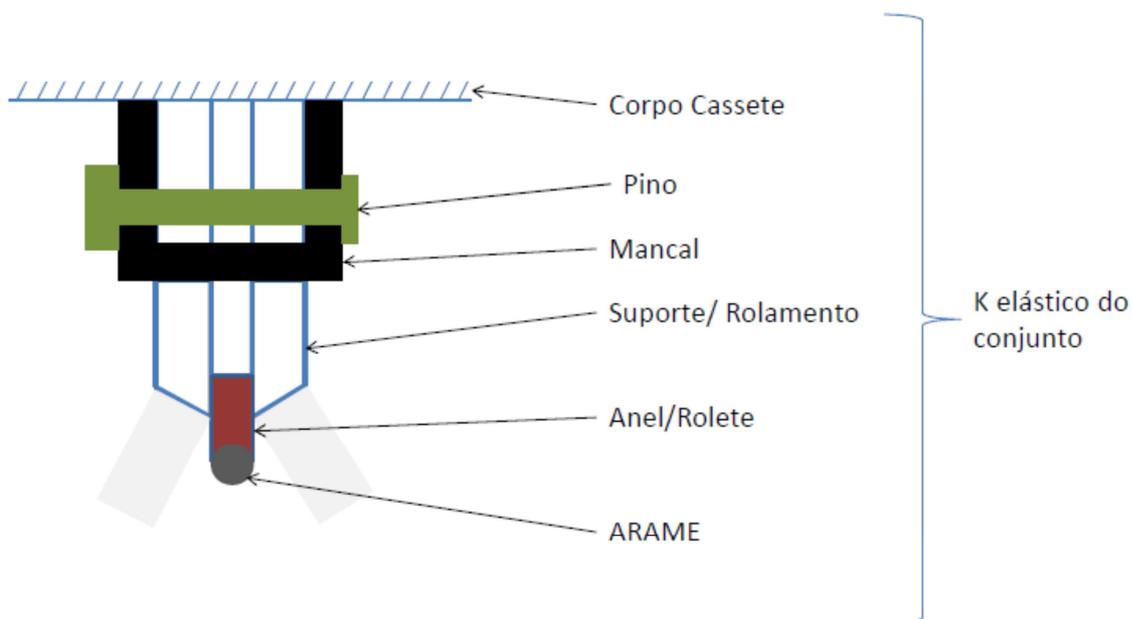


Figura 3. Conjunto de Laminação.

Para esse escopo foi considerado K_c um global que pudesse levar em conta todos os comportamentos elásticos de reação às forças de laminação, conforme Fig. 3. Foi considerado que a qualquer variação de bitola do Fio-Máquina, o Conjunto de Laminação responda com uma reação proporcional à própria constante elástica K_c . A convenção utilizada para as forças e deslocamentos é conforme a Fig. 4. A relação entre uma força derivada da variação dimensional no Fio-Máquina e os deslocamentos/Constante K_c , numa condição de equilíbrio instantâneo é a seguinte:

$$F_A = F_L = K_c \Delta x \quad (4)$$

$$\Delta x = \frac{F_A}{K_c} \quad (5)$$

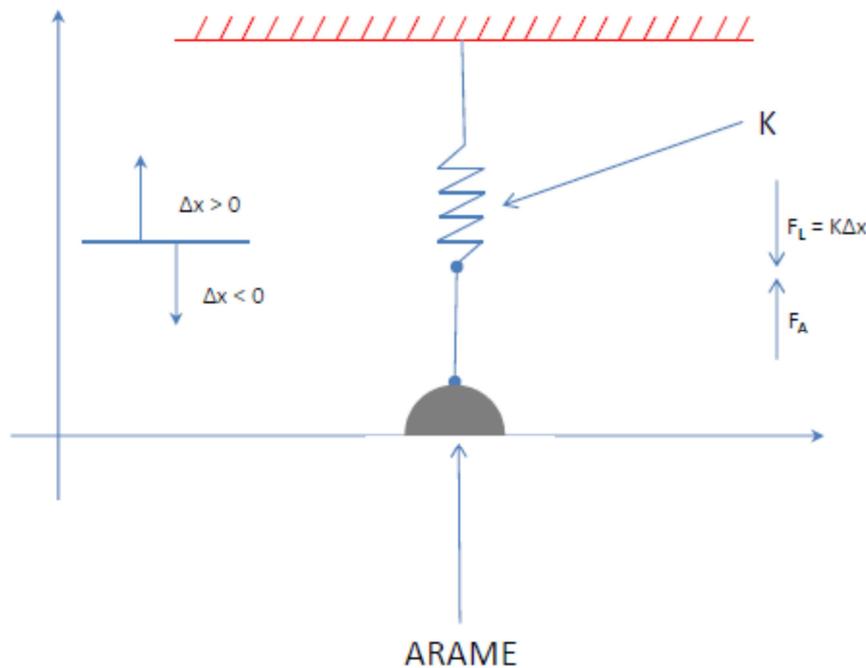


Figura 4. Rigidez do Conjunto de Laminação.

A Força de Laminação instantânea bem como as pressões radiais e longitudinais, foram calculadas utilizando os parâmetros geométricos da secção de laminação e a fórmula de Siebel, ajustada com parâmetros aptos para laminação:

$$F_{z(t)} = A_{1n} \cdot R_{emn} \cdot \left(\ln \frac{A_o(t)}{A_{1n}} + \frac{2\alpha_l(t)}{3} + \frac{\mu_l(t)}{\alpha_l(t)} \cdot \ln \frac{A_o(t)}{A_{1n}} \right) \quad (6)$$

Onde os termos são os seguintes:

$F_{z(t)}$: Força de Tração Axial calculada ao variar no tempo.

A_{1n} : Área de saída Nominal.

R_{emn} : Média das tensões de escoamento antes e depois da redução.

$A_o(t)$: Área de entrada do material na redução, calculada usando o diâmetro $D_o(t)$ da (1).

$\alpha_l(t)$: semiângulo efetivo para laminação calculado instantaneamente conforme segue:

$$\alpha_l(t) = \arctan \left(\frac{D_o(t) - D_{1n}}{\sqrt{4R(D_o(t) - D_{1n}) - (D_o(t) - D_{1n})^2}} \right) \quad (7)$$

Sendo:

R : o Raio externo do anel.

D_{1n} : O diâmetro nominal de saída do arame.

$\mu_{il}(t) = \Phi(t) \cdot \mu_l$: coeficiente ideal de fricção corrigido para laminação e calculado Instantaneamente.

$\Phi = 1 + 0,12 \cdot (\Delta(t) - 1)$: o Fator de não homogeneidade de Wistreich.

μ_l : o coeficiente de atrito conforme a Tabela 1.

$\Delta(t)$ o comprimento de secção de laminação em função do tempo.

A variação das forças de laminação é importante sendo que elas interagem diretamente com as forças elásticas do Conjunto de Laminação.

O deslocamento decorrente desta ação foi chamado de $\Delta D(t)_{fm}$, entendendo que há um aumento do diâmetro do arame igual ao cedimento do Conjunto de Laminação.

3.4 Sabão Lubrificante

O sabão lubrificante sofre um desgaste natural do poder de lubrificação, devido a contaminação de fatores externo (umidade, sujeira, carepa).

Foi então explicitada uma função linear para levar em conta a perda do poder de lubrificação conforme segue:

$$\mu_l(t) = \mu_l + X_{lub} \cdot t \quad (8)$$

Sendo

$$X_{lub} = \frac{(\mu_d - \mu_l)}{t_c} \quad (9)$$

Onde

μ_d : é o coeficiente de fricção a seco.

t_c : é o tempo de desgaste completo das propriedades do sabão lubrificante.

Substituindo a (8) na equação da força de tração (6) e nas demais equações envolvidas, é possível monitorar a influência da variação do coeficiente de fricção na variação das pressões de contato.

O deslocamento decorrente desta ação foi chamado de $\Delta D(t)_l$ entendendo que há um aumento do diâmetro do arame igual ao cedimento do Conjunto de Laminação.

3.5 Temperatura do Arame

A variação da temperatura do arame proporciona um aumento ou diminuição do diâmetro do mesmo. Como consequência, o efeito da variação da temperatura pode ser assimilado ao processo de variação de bitola do Fio-Máquina e tratado do mesmo jeito, ou seja, considerando as suas interações com o sistema elástico do Conjunto de Laminação. A variação ocorre principalmente nas fases transitórias do processo (começo e término da bobina) e pode ser representada pela fórmula da variação no campo elástico:

$$\Delta D_{tf}(t) = D_{1n} \cdot \alpha_a \cdot (T_a(t) - T_{ra}) \quad (10)$$

Sendo:

α_a : O coeficiente de dilatação linear do aço conforme Tabela 1.

$T_a(t)$: a temperatura do arame em cada instante.

T_{ra} : temperatura de referência do arame (considerada como a temperatura do regime estacionário, ou seja, quando acontece a produção da maior quantidade de produto durante o ciclo de produção).

3.6 Temperatura dos Roletes

Também a variação da temperatura dos roletes proporciona um aumento/diminuição do diâmetro do arame, como consequência da contração/dilatação dos anéis durante as fases transitórias. Diferentemente da variação de temperatura no arame, a variação nos roletes acontece na parte do Conjunto de Laminação e por isso é levada em conta como pura variação geométrica e sem considerar as interações desta variação com o sistema elástico do Conjunto de Laminação. Sendo a rigidez

do carbeto de tungstênio muito maior do que a do aço considera-se que a variação seja transferida toda para o arame como variação de diâmetro do arame mesmo. Então, a variação do diâmetro do arame em função da variação do diâmetro dos roletes no campo elástico pode ser considerada como:

$$\Delta D_{tr}(t) = 2 \cdot R \cdot \alpha_w \cdot (T_w(t) - T_{rw}) \quad (11)$$

Sendo:

α_w : O coeficiente de dilatação linear do carbeto de tungstenio conforme Tabela 1.

$T_w(t)$: a temperatura do rolete em cada instante.

T_{rw} : temperatura de referencia do rolete (considerada como a temperatura durante a fase a regime estacionário do ciclo de produção ou seja, quando acontece a produção da maior quantidade de produto).

3.7 Definição da Massa Linear e Soma dos Efeitos de Variação

A variação da massa linear fica entao definida como:

$$\Delta ML(t) = \frac{D_1(t)^2}{D_{1n}^2} - 1 \quad (12)$$

Onde:

$D_1(t)$: Diâmetro Real de saída do arame no tempo.

D_{1n} : Diâmetro Nominal de saída do arame.

Sendo assim o Diâmetro Real pode ser também expresso como:

$$D_1(t) = D_{1n} + \Delta D(t)_{fm} + \Delta D(t)_l + \Delta D_{tf}(t) + \Delta D_{tr}(t) \quad (13)$$

A união das formulas (12) e (13), então, leva em conta a variação da massa linear em função dos fatores que influenciam a mesma.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de simular a variação da Massa Linear em um ciclo com regime misto estacionário-transitório, foi estudada a laminação de um arame bitola 4,20mm, produzido em uma maquina laminadora de três passes a partir de Fio-maquina Ø6,50 mm. Foi considerada a produção de uma bobina de 2.500 kg em um tempo de 25 minutos, sendo 21,5 minutos de laminação e 3,5 minutos para troca do carretel.

A rampa de aceleração/desaceleração foi considerada de 20 segundos.

O tempo de resfriamento e de reaquecimento completo foi considerado igual entre eles e ao tempo de troca da bobina (3,5 minutos, ou seja, 210 segundos).

Os parâmetros de temperatura em regime estacionário foram considerados conforme Tabela 2, enquanto os valores mínimos alcançados durante a parada da máquina para troca do carretel foram resumidos na Tabela 3.

Tabela 2. Temperaturas no regime estacionário

Draft [-]	Inlet Diameter [mm]	Outlet Diameter [mm]	Outlet Speed [m/s]	Wire Temp. [C°]	Roll Holder Temp. [C°]	Ring Temp. [C°]	Pin Temp. [C°]
1	6,500	5,500	10,5	112,4	100,0	80,0	28,0
2	5,500	4,750	14,1	104,2	110,0	90,0	29,0
3	4,750	4,200	18,0	99,9	120,0	100,0	30,0

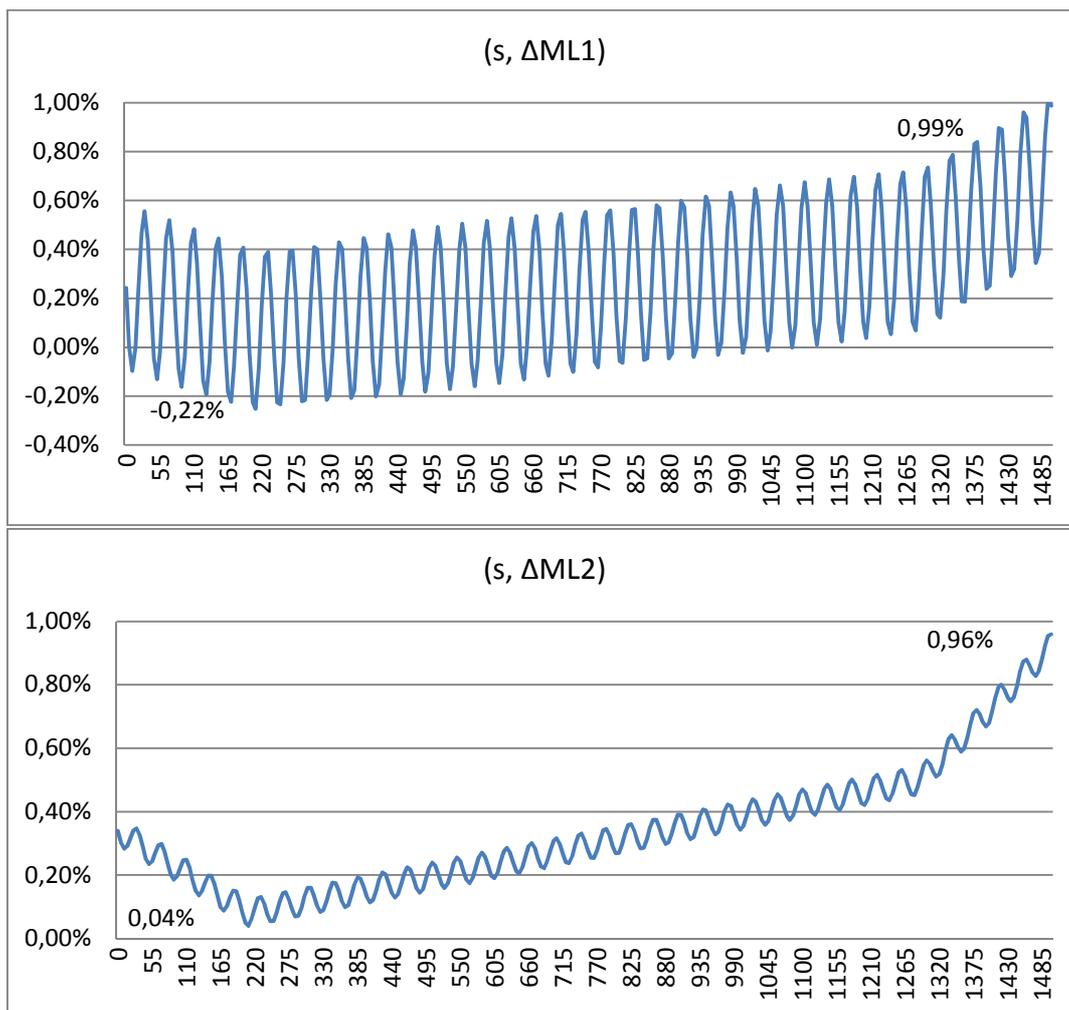
Tabela 3. Temperaturas mínimas

Draft [-]	Inlet Diameter [mm]	Outlet Diameter [mm]	Outlet Speed [m/s]	Wire Temp. [C°]	Roll Holder Temp. [C°]	Ring Temp. [C°]	Pin Temp. [C°]
1	6,500	5,500	0,0	101,2	90,0	72,0	25,2
2	5,500	4,750	0,0	93,8	99,0	81,0	26,1
3	4,750	4,200	0,0	89,9	108,0	90,0	27,0

A variação de velocidade e temperatura, durante o regime transitório, foi considerada linear.

Plotando em um gráfico os resultados obtidos para ΔML (Figura 5), dá para destacar:

- A influência da variação da temperatura no regime transitório entre 0-210 seg e entre 1290-1500 seg.
- A influência da variação do fio-máquina com andamento senusoidal. Ela é mais destacada no primeiro passo e vai diminuindo nos dois passos seguintes.
- A influência da diminuição do poder de lubrificação, percebida no aumento gradual da massa linear é destacada melhor na parte de funcionamento a regime estacionário (parte central).



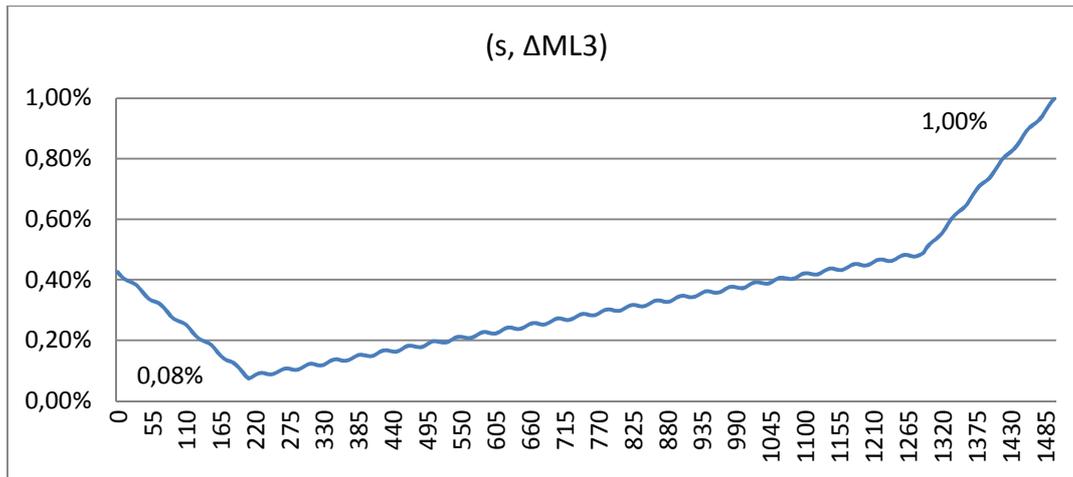


Figura 5. Variação da Massa Linear

Para avaliar a dependência da ΔML da Rigidez do Conjunto de Laminação, da temperatura e do lubrificante, é possível variar esses parâmetros e perceber:

- Uma variação da amplitude das oscilações proporcional com K_c .
Uma variação da ΔML no transitório proporcional com a diferença entre temperatura a regime estacionário e temperatura mínima.
- Uma variação da pendência no trecho em regime estacionário inversamente proporcional com m_f , ou seja com Coeficiente de aumento do coeficiente de fricção.

4 CONCLUSÕES

O modelo elaborado dá para trazer as seguintes conclusões:

- Uma rigidez maior do Conjunto de Laminação, entendido como conjunto de roletes, suportes porta-rolô, estrutura do cassete, leva a uma maior estabilidade em geral do processo de produção e a uma diminuição das variações RELATIVAS da massa linear.
- Um controle melhor das temperaturas nos transitórios leva a uma diminuição importante das variações ABSOLUTAS da massa linear.
- Um melhor resfriamento do Conjunto de Laminação, que geralmente tem efeitos muito benéficos em relação a outros fatores relacionados à durabilidade do ferramental, não tem um impacto muito grande no controle da massa linear, a não ser de manter baixa a TEMPERATURA MÁXIMA no período de regime constante, então de diminuir a variação absoluta dos valores de resfriamento dos conjuntos. Seria muito mais eficaz controlar as TEMPERATURAS MÍNIMAS na fase do regime transitório.
- Um melhor controle e cuidado com a lubrificação leva a uma maior estabilidade TENDENCIAL da massa linear.
- O modelo proposto, mesmo que simplificado, é um modelo versátil, sendo que considera a variação da massa linear como soma de fatores relacionados a forças-rigidez de um lado e temperatura do outro. A inclusão do estudo de demais fatores que impactam no processo de laminação, poderá ser feita desde que os relacionando às forças ou as temperaturas.

Agradecimentos

Marco Castenetto - Danieli Morgardshammar Bar & Wirerod Mills.
Clément Barrat – Condat do Brasil - Divisão Arames e Tubos.

REFERÊNCIAS

- 1 Enghag P. Steel Wire Technology Edição 4 Örebro – Sweden; Repro Örebro University; 2009
- 2 Bitkov V. Expediency of Roller Dies Application in Wire Drawing
Part1 - Wire & Cable Technology International / Janeiro 2008
Part2 - Wire & Cable Technology International / Março 2008.
- 3 Basuc D. Cenni sui processi di Lavorazione per deformazione.
Disponível em: <http://corsiadistanza.polito.it/corsi/pdf/9638A/sez1.pdf>
- 4 Beretta S. Appunti di Costruzione di Macchine 2.
Disponível em: http://cm2.mecc.polimi.it/Lezioni/CM2_19.pdf
- 5 Broggiato Solidi assialsimmetrici – Dischi. Disponível em:
[http://dma.dma.uniroma1.it/users/broggiato/cdm/roma/vo/ecdm/dispense/\[26\]Dischi.pdf](http://dma.dma.uniroma1.it/users/broggiato/cdm/roma/vo/ecdm/dispense/[26]Dischi.pdf)
- 6 Esposito L. Stato di sforzo in solidi assialsimmetrici.
Disponível em: http://www.cdmunicas.it/files/2010_CDM_Solidi-assialsimmetrici.pdf
- 7 Petrucci G. Lezioni di Costruzioni di Macchine.
Disponível em: <http://www.unipa.it/giovanni.petrucci/Disp/Dischi%20rotanti.pdf>