

ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA MASSA LINEAR AO LONGO DA PRODUÇÃO DE FIOS DE CA-60 EM LAMINADORES A FRIO¹

Felipe Farage David²
Peterson Felipe Freitas de Almeida³
Lucas Sonego Fernandes⁴

Resumo

A produção de fios de CA-60 apresenta alta relevância devido a sua vasta aplicação nos produtos ampliados (telas e treliças), alavancado pela crescente demanda por produtos na área da construção civil. Uma das propriedades de exigência da Norma ABNT/ NBR 7480/07 é a massa linear, que tem efeito direto na carga máxima a que o componente estrutural pode ser submetido em serviço. O controle desta variável no processo produtivo é de demasiada importância para o correto atendimento das normas já citadas. O propósito desse artigo é estudar o comportamento da massa linear ao longo da produção de fios de CA-60 em laminadores a frio com cassete, determinando as principais variáveis de processo que afetam seu valor. A metodologia utilizada neste estudo consiste na aplicação de ferramentas estatísticas, tais como análise de correlação e regressão.

Palavras-chave: Trefilação; CA-60; Cassete; Deformação plástica.

VARIABILITY ANALYSIS OF LINEAR MASS ALONG THE PRODUCTION OF REINFORCING WIRE IN COLD ROLLING MACHINE

Abstract

The reinforcing wire production CA-60 is highly relevant due to its wide application in concrete products (welded wire mesh and truss girder), driven by growing demand for products of the construction area. One of the properties required by ABNT / NBR 7480/07 is the linear mass, which has a direct effect on the maximum load that the structural component may be subjected in service. The control for this variable in the production process is much important for the proper care of the aforementioned standards. The purpose of this paper is to study the behavior of the linear density along the reinforcing wire production CA-60 in cold rolling machines using cassettes, determining key process variables that affect its value. The methodology used in this study is the application of statistical tools such as correlation and regression analysis.

Keywords: Drawing; CA-60; Cassette; Plastic deformation.

¹ Contribuição técnica ao 4º Seminário de Trefilação: Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não-ferrosos, 26 e 27 de novembro de 2013, São Paulo, SP.

² Engenheiro Metalúrgico pela IFES, Mestrando. UFPE. Responsável técnico pelo desenvolvimento de produtos e processos da Gerdau Açonorte, Recife, Brasil.

³ Graduando em Engenharia Mecânica da UFPE, Recife, Brasil.

⁴ Engenheiro Mecânico. Chefe da Oficina de Cassetes da Gerdau Açonorte, Recife, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Pode-se dizer que a maior revolução na trefilação foi o desenvolvimento dos cassetes. Os primeiros a publicarem artigos sobre o tema foram os japoneses,⁽¹⁾ porém são os italianos os responsáveis pela execução de uma ideia que nasceu tentando aproximar os processos de laminação e trefilação. Uma mudança forte que acabou mudando o nome do processo para microlaminação. Os cassetes foram desenvolvidos justamente para mitigar os efeitos improdutivos do atrito entre a fieira e o arame, ou seja, reduzindo significativamente a velocidade relativa entre a superfície do fio e o elemento trefilador. Ao invés de se utilizar um componente estático (em relação a direção do arame), se utilizou um rolo laminador, que com um canal projetado para reduzir a seção do arame e realizar o acabamento do material, gira com o fio reduzindo drasticamente o atrito no processo.⁽²⁾ Estudos revelam que essa diminuição de esforços reduz em até 34,5% a potência necessária para a trefilação.⁽³⁾

Um tanto maior e mais robusto que a fieira, o cassete possui duas fases de transformação do arame e, para tal, dois trios de rolos realizam esse trabalho. O primeiro trio tem a função de reduzir a seção do arame deixando-o em um formato oval e o segundo trio tem o papel de transformá-lo em seção circular, realizando o acabamento no material. Esses dois passos substituem a fieira. O ganho de produtividade deve-se ao fato de que devido a redução do atrito, se consegue velocidades superiores às velocidades de trefilação com fieiras. O ônus disso é a complexidade do cassete devido aos seus componentes necessitarem de cuidados especiais. Tratando-se de rolo, sugere-se rolamento que, por sua vez, necessita de lubrificação especial e só desempenha sua função dentro de uma faixa controlada de temperatura. Todos esses detalhes que tornam o processo de microlaminação um processo minucioso também requerem um pessoal técnico especializado para realizar as montagens, regulagens, ajustes e manutenções nos cassetes.

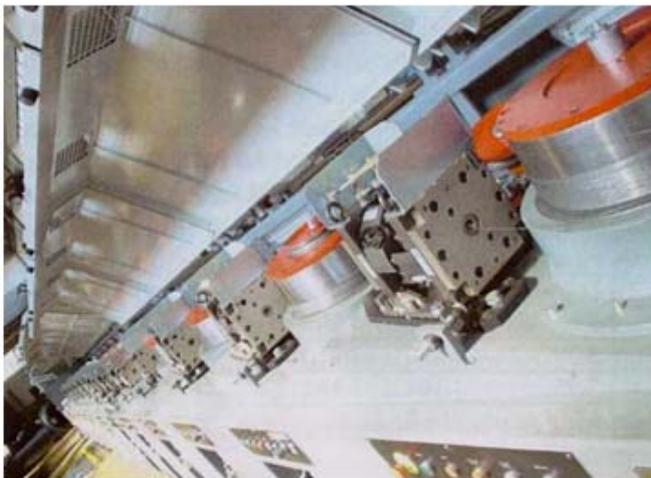


Figura 1. (a) Máquina de trefilação via microlaminação de arames e (b) bobina de fio de aço CA-60.⁽¹⁾

Ganha-se em produtividade e, a médio prazo, no custo operacional devido a maior produção horária das máquinas de trefilação com cassetes, mesmo investindo-se em estrutura de ferramental e em pessoas qualificadas devido aos cuidados mencionados anteriormente. Outro ponto bastante peculiar do processo de microlaminação são os fenômenos que acontecem no cassete em operação. O arame trefilado por fieira recebe sua identidade justamente como a fieira o trefilou,

como um componente único e de geometria definida. O cassete precisa ter os rolos alinhados de tal forma que não haja resquírios visíveis de que foi microlaminado, sem marcas, frisos, sem ovalização etc. Porém, os ajustes feitos pelo técnico especializado sofrem alterações importantes durante o processo e que muitas vezes se tornam indesejáveis se não controlados.

Os rolos são montados em eixos projetados e fabricados com canais de refrigeração e lubrificação que permitem que os rolamentos operem dentro das condições adequadas de temperatura. Esses eixos são montados em carcaças, que também possuem canais de refrigeração e lubrificação que abastecem todos os eixos e rolos do cassete. O movimento rotativo do rolamento cria zonas de atrito que geram calor ao redor do rolo e, tratando-se de encruamento de metais, há também uma geração térmica nos planos de deslizamento da microestrutura do arame. Essas fontes de geração de calor acabam se transferindo para toda a carcaça do cassete, tornando essenciais e vitais os controles com água refrigerada e lubrificação adequada.⁽¹⁾

Mesmo dentro das faixas normais de operação, os rolos chegam a operar com temperaturas entre 80 e 130°C, dependendo do tipo de máquina, condição do sistema de refrigeração e lubrificação e do plano de passe utilizado. O ajuste fino do cassete é feito em oficinas preparadas para tal procedimento, normalmente à temperatura ambiente. Por outro lado, a variação de temperatura na máquina de trefila desde o início da produção até a velocidade nominal é suficiente para dilatar os rolos e essa dilatação afeta diretamente a redução do arame, alterando o diâmetro na mesma proporção na qual se dilatam os rolos com o calor do processo.

Se há variação geométrica na formação dos perfis dos rolos de microlaminação, há variação geométrica no arame que está sendo microlaminado por esses rolos. Essa alteração, durante o processo, pode acarretar em problemas sérios de qualidade que podem comprometer a aplicação do produto. A ABNT regulamenta os fios de aço para concreto armado e limita a massa linear dos arames CA-60 em quilogramas por metro, pois possuem seção transversal particular e não podem ser controlados pelo diâmetro. O processo de microlaminação do CA-60 necessita de parâmetros bem controlados e bem monitorados para garantir a faixa de massa linear regulamentada pelas normas, pois são materiais de aplicação direta na construção civil e em hipótese alguma podem ser comercializados fora das tolerâncias estabelecidas. Por conta disso, a variação térmica no processo, se não controlada, pode comprometer o processo, gerar enormes perdas e, em algumas situações, impedir a produção desses materiais.

Tratando-se de uma característica tão importante como a massa linear dos arames CA-60, torna-se fundamental a aplicação de medidas de monitoramento e modelos matemáticos para estimar o fenômeno de variabilidade da massa linear, garantindo esse parâmetro dentro das faixas normais de trabalho e de comercialização.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para realização da análise da variabilidade da massa linear do material microlaminado ao longo da bobina de CA-60, realizou-se o monitoramento das principais variáveis de processo do Laminador a Frio. As variáveis monitoradas foram a velocidade de trefilação e a temperatura do rolo do cassete.

A temperatura foi monitorada a partir de um termômetro de radiação infravermelha (Raytek modelo RAYST 80X BISUS) com resolução de 0,1°C. A emissividade adotada foi de 0,95 (parâmetro para emissividade de superfície negra e opaca). O ponto de monitoramento foi na proteção do rolamento do rolo do cassete (Figura 2).

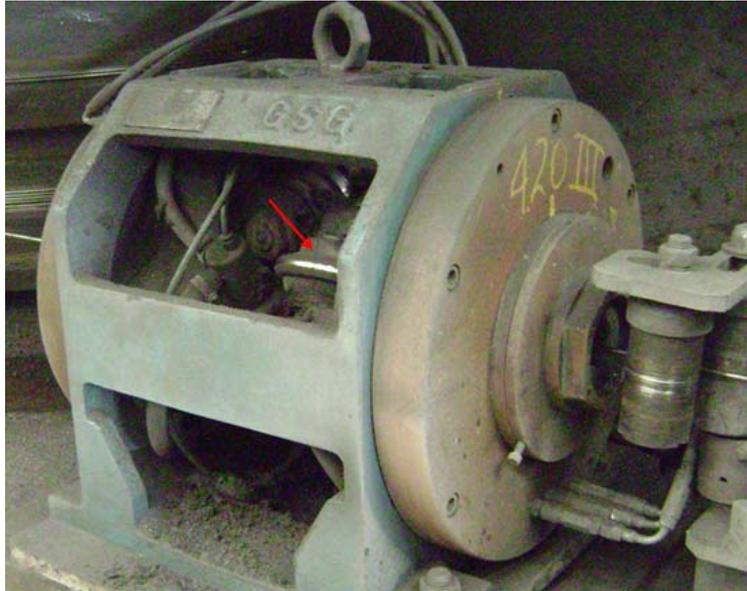


Figura 2. Ponto de monitoramento da temperatura do cassete, indicado pelo vetor em vermelho, durante a trefilação do arame de aço.

A velocidade de trefilação é medida após o último passe de redução através do número de voltas de um elemento rotativo em contato com o arame. Como a velocidade linear é a mesma do arame, a rotação é convertida em velocidade através de um sensor que envia a informação ao PLC da máquina. A máquina de trefilação é comumente composta por três reduções via microlaminação por cassetes.

As amostras de massa linear foram retiradas da bobina de CA-60 durante o seu processamento na fabricação dos produtos ampliados (Figura 3). Os ensaios de massa linear estão de acordo com a norma ABNT NBR 7480.⁽⁴⁾ Para medição da massa linear, utilizou-se uma balança de precisão (balança de precisão OHAUS modelo SP4020). Foram realizados ensaios de massa linear em 220 amostras de arame trefilado CA-60 para serem utilizados nas análises estatísticas.



Figura 3. Amostras do arame trefilado CA-60 4,20 mm.

As ferramentas estatísticas usadas foram a análise de regressão linear e polinomial e correlação entre variáveis.⁽⁵⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variação da massa linear ao longo de duas bobinas de CA-60, considerando velocidade de trefilação e temperatura do rolo do cassete está de acordo com a Figura 4. O início da trefilação da primeira bobina de CA-60 ocorre quando o cassete está a temperatura ambiente (37°C). Com o aumento da velocidade, sucede o aumento da temperatura do rolo do cassete até uma temperatura de patamar em torno de 110°C. No término da primeira bobina de CA-60, o laminador a frio é desacelerado até atingir velocidade nula. A segunda bobina de CA-60 é produzida com o cassete ainda aquecido com temperatura em torno de 80°C. Com a retomada da velocidade de trefilação, há um aumento da temperatura do rolo até atingir a temperatura de patamar em torno 115°C. No término da segunda bobina de CA-60 o laminador a frio é novamente desacelerado até a velocidade nula.

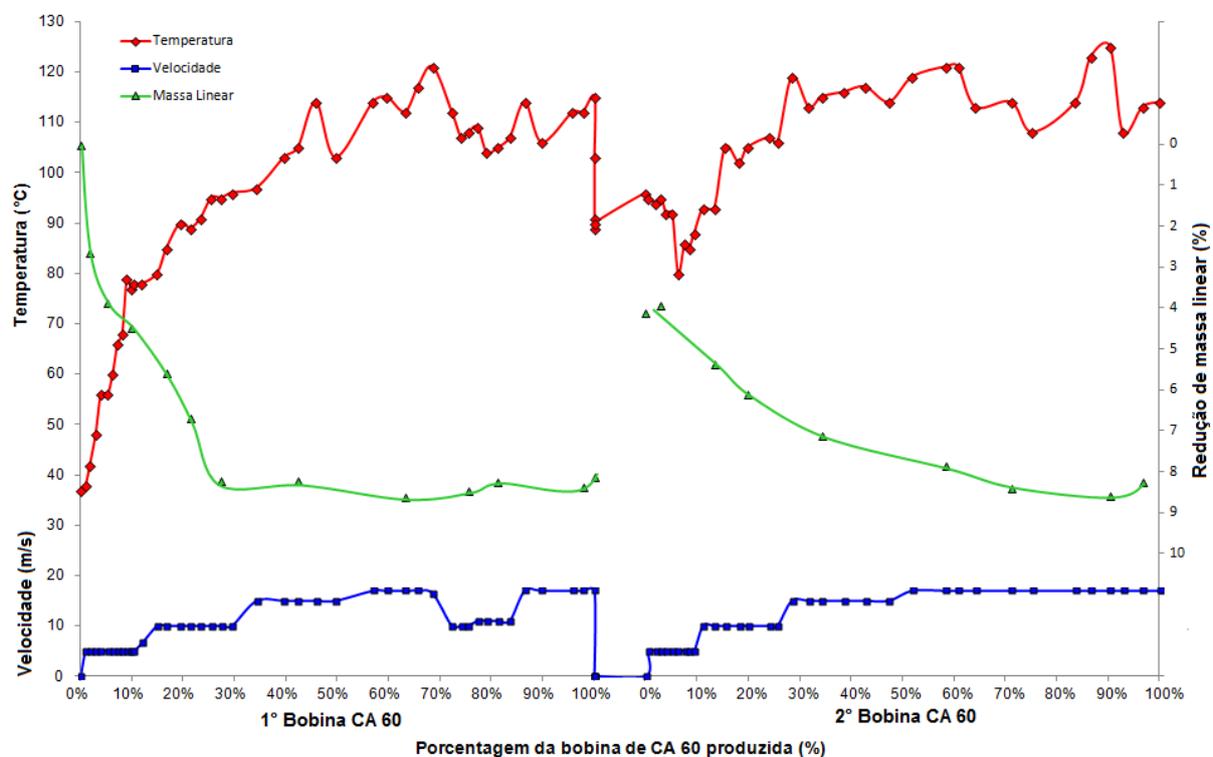


Figura 4. Variação da velocidade e temperatura do cassete de duas bobinas de CA-60 4,20 mm.

Em ambas as bobinas de CA-60 ocorrem a diminuição da massa linear ao longo da trefilação (Figura 4). Essa redução é mais acentuada quando o processo atinge a temperatura de patamar e a velocidade máxima de trefilação. A redução de massa linear é menos acentuada na segunda bobina de CA-60 que iniciou a produção com o rolo de cassete ainda aquecido (em torno de 80°C).

A partir dos dados coletados na Figura 4, foram realizadas uma análise de correlação e regressão⁽⁵⁾ entre as variáveis velocidade de trefilação, temperatura do cassete e a massa linear do arame CA-60.

A regressão entre a massa linear e a velocidade está de acordo com a Figura 5. Há uma correlação positiva moderada de 0,76 entre a redução da massa linear e a velocidade. Isso indica que quanto maior a velocidade de trefilação, maior será a redução imposta pelo cassete no arame trefilado. O aumento da velocidade de trefilação determina o aumento da temperatura dos rolos de cassete (Figura 6).

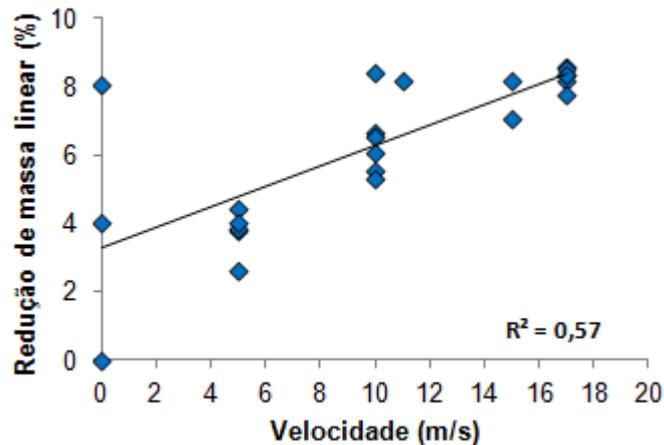


Figura 5. Correlação da velocidade de trefilação e a redução da massa linear na produção da bobina de CA-60 4,20 mm ($r = 0,76$ e $r^2 = 0,57$).

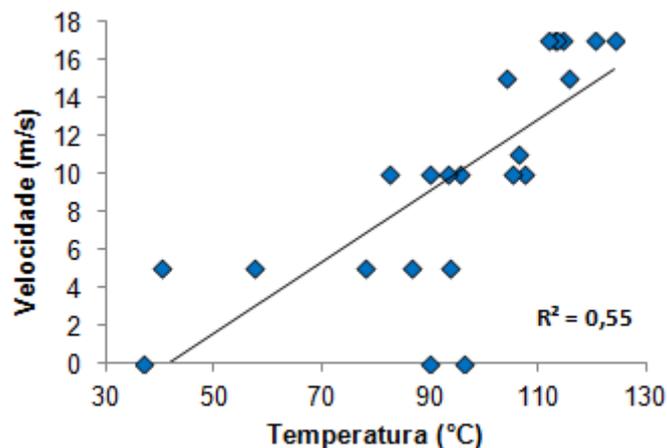


Figura 6. Correlação da temperatura do cassete e a velocidade de trefilação para o processamento da bobina de CA-60 4,20 mm ($r = 0,74$ e $r^2 = 0,55$).

A Figura 6 exibe uma correlação positiva moderada de 0,74 entre a velocidade de trefilação e a temperatura do cassete para o processamento da bobina de CA-60. De acordo com a equação 1,⁽⁶⁾ a taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) varia diretamente com a velocidade de trefilação (V). Os outros parâmetros relacionados a equação 1 são diâmetro do arame (d), relação de alongamento (λ) e semi-ângulo de trefilação (α).

$$\dot{\epsilon} = \frac{V \tan \alpha (\sqrt{\lambda} + 1)}{\lambda d} \quad (1)$$

Quanto maior a velocidade, maior a taxa de deformação e conseqüentemente maior o encruamento do metal.⁽⁷⁾ Há uma intensa geração térmica durante a deformação plástica do metal devido aos deslizamentos dos planos cristalinos. O movimento rotativo do rolamento do rolo do cassete/arame também criam zonas de atrito que geram calor ao redor do rolo. O calor gerado pelas diversas fontes (deformação plástica do arame e atrito) é transferido para o rolo do cassete, provocando a sua dilatação.

A correlação mais forte encontrada foi entre a redução de massa linear e a temperatura do rolo do cassete (Figura 7), sendo positiva de 0,87. Quanto maior a temperatura do rolo, maior a dilatação do rolo do cassete e maior a redução imposta

no arame trefilado. O arame trefilado recebe a imagem da variação da dilatação do rolo ao longo da bobina de CA-60.

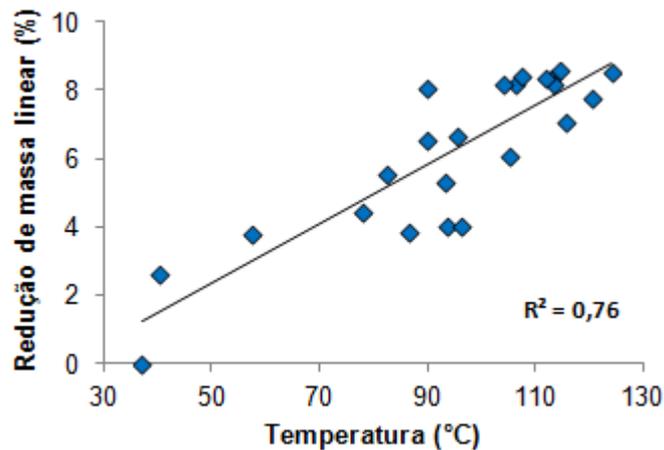


Figura 7. Correlação da redução de massa linear e temperatura do cassete na produção da bobina CA-60 4,20 mm ($r = 0,87$ e $r^2 = 0,76$).

A partir da determinação da variável temperatura do rolo do cassete como a principal influência na variabilidade na massa linear do arame CA-60 ao longo da bobina, foi desenvolvido um modelo matemático para relacionar essas duas variáveis de processo. Para isso, foi realizado um experimento em que o cassete foi aquecido a temperaturas acima de 150°C. Amostras do arame trefilado eram retiradas a medida que a temperatura do cassete diminuía. O laminador a frio era acionado somente para a retirada das amostras à velocidades de trefilação inferiores a 0,5 m/s. O resultado está de acordo com a Figura 8.

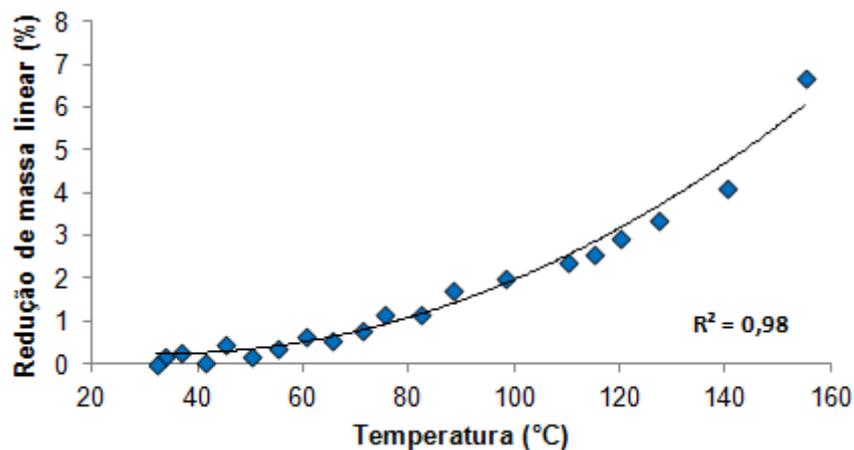


Figura 8. Relação entre a temperatura do rolo de cassete e a redução de massa linear do arame CA-60, com velocidade de trefilação inferior a 0,5 m/s ($r^2 = 0,98$).

A partir dos dados da Figura 8 foi realizado uma regressão polinomial de 2º ordem para obtenção de um modelo matemático que relaciona a temperatura do cassete (T) e a redução da massa linear ($Red\ ML$) no arame CA 60 4,20 mm (Equação 2). Na regressão foi encontrado um coeficiente de determinação igual a 0,98.

$$Red\ ML = 0,0004T^2 - 0,0266T + 0,6878 \quad (2)$$

A vantagem da obtenção do modelo matemático (Equação 2) é determinar a massa linear de calibração do cassete a temperatura ambiente, em função da temperatura máxima atingida no rolo de cassete e a massa linear mínima desejável no arame CA-60 ao longo da bobina.

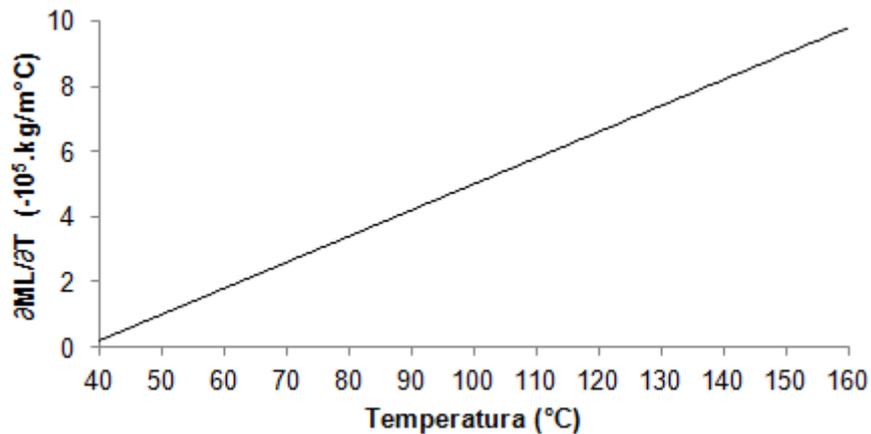


Figura 9. Curva da derivada da massa linear em função da temperatura do rolo de Cassete.

A derivada da massa linear do arame em função da temperatura no rolo do cassete está de acordo com a Figura 9. A função descreve que quanto maior a temperatura no rolo de cassete, maior será a variação da massa linear no arame trefilado e que a taxa de variação aumenta de maneira linear. Ou seja, um aumento de temperatura de 50°C para 100°C (aumento de 50°C) na temperatura do rolo do cassete reduz a massa linear do CA-60 4,20 mm em 1,7%. O mesmo aumento a partir da temperatura de 100°C para 150°C (aumento de 50°C) reduz a massa linear do CA-60 4,20 mm em 3,5%.

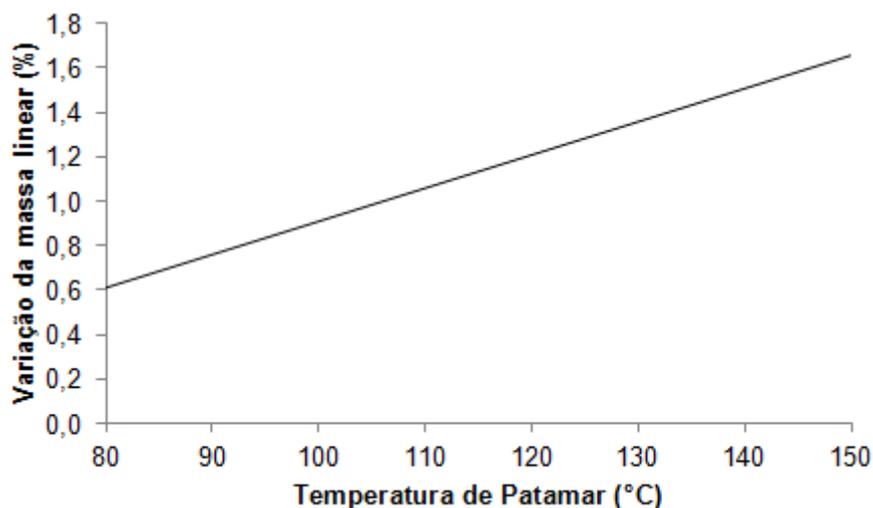


Figura 10. Variação da massa linear em função da variação da temperatura de patamar em torno de $\pm 10^\circ\text{C}$.

A Figura 10 relaciona a variação da massa linear ao longo do arame CA-60 em função da temperatura de patamar do processo de trefilação, considerando a variação da temperatura de patamar em torno de $\pm 10^\circ\text{C}$. Ao manter a temperatura de patamar em $100 \pm 10^\circ\text{C}$ a variação da massa linear do arame será em torno de 0,9%. Já a temperatura de $150 \pm 10^\circ\text{C}$ a variação da massa linear será de 1,7%. Dessa forma, a variação de massa linear é reduzida quando o processo é mantido

em temperaturas de patamar menores possíveis. A temperatura de patamar está diretamente relacionada com a eficiência do sistema de refrigeração do cassete.

4 CONCLUSÃO

O principal agente de variabilidade de massa linear é a temperatura nos rolos dos cassetes pelo fato de provocar a dilatação dos rolos. O arame trefilado, por sua vez, recebe a imagem da variação da dilatação do rolo ao longo da bobina de CA-60. Os principais geradores de calor são a taxa de deformação plástica do material durante a trefilação e o atrito na rotação do rolamento e do rolo do cassete com o arame. A taxa de deformação varia em função da velocidade de trefilação.

A temperatura de patamar influencia na variabilidade da massa linear ao longo da bobina de CA-60. A permanência em temperaturas maiores durante o processo de trefilação causam maiores variações da massa linear ao longo da bobina de CA-60.

A refrigeração é de fundamental importância para manter os rolos de cassete a temperaturas menores e mais estáveis possíveis. Dessa forma, reduz significativamente a variabilidade da massa linear do CA-60 ao longo da bobina.

Portanto, o melhor cenário para assegurar uma menor variabilidade de massa linear ao longo da bobina de CA-60, para qualquer equipamento ou processo de microlaminação por cassetes é: controlar a massa linear de setup em função da temperatura máxima de patamar do cassete (construção da equação 2 para cada material), interromper o sistema de refrigeração do cassete durante o tempo entre a produção das bobinas de maneira a manter o cassete aquecido (evitar a variação da temperatura) e manter o processo numa temperatura de patamar menor possível (investir no sistema de refrigeração dos cassetes).

Agradecimentos

Os autores agradecem a Gerdau, ao gestor da planta industrial Gerdau Açonorte Jose Luiz Lopes de Sousa e aos gestores Pedro Magalhães de Oliveira, Saulo Rodrigo Dias Pimentel e Fábio Lourenço Marques da Silva pelo apoio ao estudo. Aos analistas da qualidade Lúcio Bezerra, Jamerson Bruno, Izaias Sousa Silva, Daniel Chaves, Jamesson Cassimiro e Alexandre Pontes pela realização dos ensaios do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 ENGHAG, P. Steel Wire Technology. Orebro: Applied Materials Technology, 2009.
- 2 BITKOV V.V. Expediency of Roller Dies Application in Wire Drawing: Part 1. Wire & Cable Technology International. Ohio, v. 35, n. 1, p. 58-2, jan. 2008.
- 3 BITKOV V.V. Expediency of Roller Dies Application in Wire Drawing: Part 2. Wire & Cable Technology International. Ohio, v. 36, n. 2, p. 112-2, mar. 2008.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7480: Aços Destinados a Armaduras para Estruturas de Concreto Armado - Especificação. Rio de Janeiro, 2007. 13 p.
- 5 MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Applied Statistics and Probability for Engineers. Arizona: John Wiley & Sons, 2011.
- 6 HE, S.; HOUTTE, P. V.; BAEL, A. V.; MEI, F.; SARBAN, A.; BOESMAN, P. Strain rate effect in high-speed wire drawing process. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, United Kingdom, v. 10, n. 3, p. 267-9, mar. 2002.
- 7 DIETER, G. E. Mechanical Metallurgy. London: McGraw Hill, 1988.