

CONTROLE DAS CONDIÇÕES DO FIO MÁQUINA LAMINADO EM AÇO ALTO TEOR DE CARBONO (ATC) PARA SUBSTITUIÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE PATENTEAMENTO ¹

Adriano de Albuquerque Vicente ²

Douglas de Araújo Galeano ³

Eduardo da Silva Pereira Duarte ⁴

Marco Antônio Parise ⁵

Milton Gastaldo ⁶

Resumo

O produto da trefilação de fio máquina do aço SAE 1080 modificado produzido em Aços Villares é comumente aplicado para fabricação de molas mecânicas de alto teor de carbono atendendo restritos valores de propriedades mecânicas especificadas. A garantia desta restrição é conseguida pela redução de área na etapa final de trefila, e depende diretamente da uniformidade de composição química, microestrutura e propriedade mecânica do fio máquina laminado. Com a instalação do resfriamento controlado (*Retarded or Accelerated Cooling*) após laminação e a transferência da trefilaria da Aços Villares de Sorocaba para Pindamonhangaba, o processo de tratamento térmico de patenteamento que precedia a trefilação foi substituído pelo resfriamento controlado após laminação. Para o sucesso desta substituição foi necessário adaptar o processo de aciaria e laminação. O objetivo deste trabalho é apresentar a metodologia utilizada para viabilizar a mudança de processo, utilizando-se de ferramentas estatísticas, tais como, Estratificação Gráfica por pontos e Projeto de Experimentos (DOE), analisando as principais variáveis de processo de aciaria e laminação. Os resultados obtidos mantiveram a produtividade na trefilaria através das seguintes ações: ajuste de composição química e alteração na condição de laminação e resfriamento controlado, atendendo a especificação restrita de Limite de Resistência e Torção no produto após trefila.

Palavras-chave: Resfriamento controlado; Projeto de experimentos; Trefilação; Arame alto teor de carbono.

CONTROLLED HOT ROLLED ROD OF HIGH CARBON STEEL TO SUBSTITUTE PATENTING HEAT TREATMENT

Abstract

The cold drawn wire of SAE 1080 produced at Aços Villares is usually applied for mechanical springs with restricted specifications of mechanical properties. The guarantee of this restriction is obtained by reduction of area at the cold drawn, and depends directly of the chemical composition, microstructure and mechanical properties of hot rolled rod. With startup of controlled cooling (*Retarded or Accelerated*) after hot rolling and the drawn mill transference from Sorocaba to Pindamonhangaba, the patenting heat treatment before cold drawn process was substituted by controlled cooling after hot rolling. For the success of this substitution was necessary to adapt rolling mill and melting shop processes. The aim of this paper is to present the methodology allow this change, using statistical tools, like, Graphical Stratification and Design of Experiments (DOE), analyzing main rolling mill and melting shop parameters. The gotten results had kept the productivity at drawn mill through the following actions: adjustment of chemical composition, changes at hot rolling temperature and controlled cooling conditions, meeting restricted specifications of strength and torsion after cold drawn

Key words: Controlled cooling; Design of experiments; Cold drawing; High carbon drawn wire

¹ *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.*

² *Supervisor Técnico Engenharia de Processo - Aços Villares S/A*

³ *Técnico de Produto – Engenharia de Processos - Aços Villares S/A*

⁴ *Gerente Técnico da Unidade de Negócio Construção Mecânica - Aços Villares S/A*

⁵ *Técnico de Produto – Fábrica de Arames - Aços Villares S/A*

⁶ *Supervisor Técnico Laminação Leve - Aços Villares S/A*

1 INTRODUÇÃO

O arame trefilado para fabricação de molas mecânicas é um produto ao qual está associado requisitos de qualidade com faixas ou limites de tolerância bem definidos de propriedades mecânicas. Alta resistência a tração com baixa variação, boa ductilidade, boa elasticidade e elevada resistência à fadiga, são fundamentais para que este arame apresente um bom comportamento na confecção e utilização das molas.

Tendo em vista as dificuldades que freqüentemente ocorrem quando se pretende atingir as especificações requeridas, o processo de fabricação de arame para molas mecânicas contava com um tratamento térmico de patenteamento ao chumbo no fio máquina laminado antes da trefilação. A obtenção de uma estrutura perlítica fina no aço para atender as necessidades do processo era feita através deste tratamento térmico.

Nos últimos anos, com a necessidade crescente de se reduzir os custos de produção, novas tecnologias foram e estão sendo desenvolvidas para se atender as mesmas exigências de qualidade no fio máquina patenteado. Um dos campos de grande desenvolvimento, neste sentido é a utilização de processos de controle do resfriamento do fio máquina após laminação a quente, visando eliminar custos com tratamentos térmicos posteriores. Neste sentido, laminadores estão adotando um sistema de resfriamento de fio máquina do tipo “Retarded or Accelerated Cooling”, capaz de controlar os parâmetros de resfriamento de forma a se obter produtos com microestrutura adequada ao seu processamento posterior.^(1,2)

Um dos produtos passíveis de serem beneficiados com esta tecnologia é o fio máquina do aço SAE 1080. O material é resfriado ao longo de uma esteira podendo ser acelerado por meio de ventiladores ou retardado por meio de tampas da esteira de modo a obter-se a estrutura desejada. Este resfriamento controlado substitui a necessidade do tratamento térmico de patenteamento do fio máquina.^(1,2)

A trefilação de um aço alto teor de carbono é uma operação que pode ser feita em máquina de trefilação de passes contínuos, normalmente inferiores a 25% de redução de área por passe e redução de área total de 70 à 90% sem tratamentos intermediários.

Uma considerável variação na ductilidade pode ser encontrada em arames trefilados sobre condições similares. As razões para essas variações nas propriedades, que frequentemente são motivos de rejeição por ductilidade inadequada, podem ser de ordem operacional ou atribuídas ao material.

Os ensaios usados na indústria de trefilação para avaliação da ductilidade do arame incluem a medida da estricção no ensaio de tração, determinação do número de dobramentos em flexões alternadas do arame até a ruptura e a determinação do número de torções do arame em torno do seu eixo antes do rompimento. O tipo de fratura ocorrido no ensaio de torção informa o estado de ductilidade do fio.

Um aumento na temperatura do arame durante o processo de trefilação pode levar ao aumento significativo de resistência e decréscimo nos valores de ductilidade, devido a efeitos de envelhecimento estático e/ou dinâmico. Conforme resultados de Nakamura et al.⁽³⁾ e Yamada⁽⁴⁾ o efeito de envelhecimento não ocorre a temperatura inferior à 450°C. Outro fator influente na ductilidade é a redução de área por passe, a boa prática indica que reduções de área inferiores a 20% por passe garantem boa ductilidade conforme Godecki.⁽⁵⁾

Os teores dos elementos químicos residuais Cr, Ni, Cu e Mo também afetam diretamente a propriedade mecânica do fio máquina de partida. Em máquinas de trefilação de passes contínuos a velocidade de trefilação é reduzida quando a somatória desses elementos ultrapassa 0,25% para reduções acima de 70%, visando atingir as propriedades especificadas no arame trefilado.

Para não ocorrer perda de produtividade nem perda de propriedades mecânicas, a mudança de processo do fio máquina patenteado para fio máquina laminado com resfriamento controlado deu-se através de ajuste da composição química e condições de resfriamento após laminação utilizando a metodologia descrita a seguir.

2 METODOLOGIA

O trabalho foi dividido em 2 etapas:

2.1 Análise da Composição Química

O aço perlítico SAE 1080 apresentava relevante amplitude de variação do limite de resistência a tração ao longo da bobina e valores acima do máximo especificado pelo cliente, afetando diretamente na velocidade de processamento destes materiais na trefilaria.

Quando o limite de resistência encontrava-se acima do especificado ou apresentava heterogeneidade ao longo da bobina a velocidade máxima de processamento na trefilação era de 1 à 1,7m/s.

Foi gerado um banco de dados que mostrava que algumas corridas eram processadas em velocidade maior. Em 15 corridas processadas, 10 apresentaram resultados considerados bons (similares ao patenteado) e 5 consideradas ruins.

Os dados levantados de composição química das corridas foram trabalhados através de técnicas estatísticas (média, desvio padrão e Teste T) e os elementos químicos de maior dispersão foram usados para elaboração de estratificação gráfica por pontos (Cr, Ni, Cu, Mo, S e a Somatória (Cr+Ni+Cu+Mo)).

A avaliação comparativa de grupos de 10 corridas boas e 5 ruins permitiu identificar áreas favoráveis de forma a considerar a variação simultânea dos residuais e sua interação.

A verificação do grau de cumprimento das áreas favoráveis dos gráficos permitiu direcionar os próximos vazamentos para a redução do problema e auxiliou nos estudos estatísticos posteriores com técnicas dedicadas às variáveis mais influentes para ajuste otimizado do processo de laminação.

O registro gráfico dos parâmetros de cada corrida foi realizado agrupando-se duas variáveis para facilitar a identificação das áreas favoráveis, sem estabelecer qualquer correlação entre os parâmetros, já que os grupos de corridas boas e corridas ruins contemplam esta separação.

Os gráficos representam:

% S X % Cr (Gráfico 1)

% Ni X % Somatório (Cr+Ni+Cu+Mo) (Gráfico 2)

% Mo X % Cu (Gráfico 3)

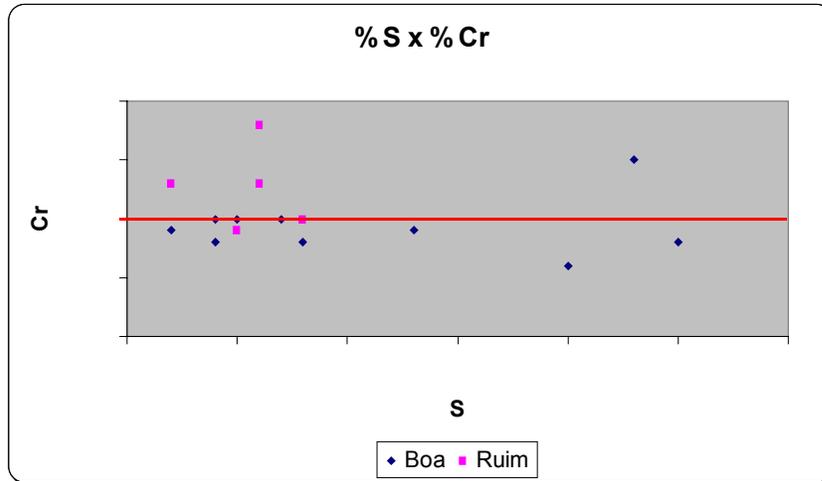


Figura 1. Estratificação %S x %Cr

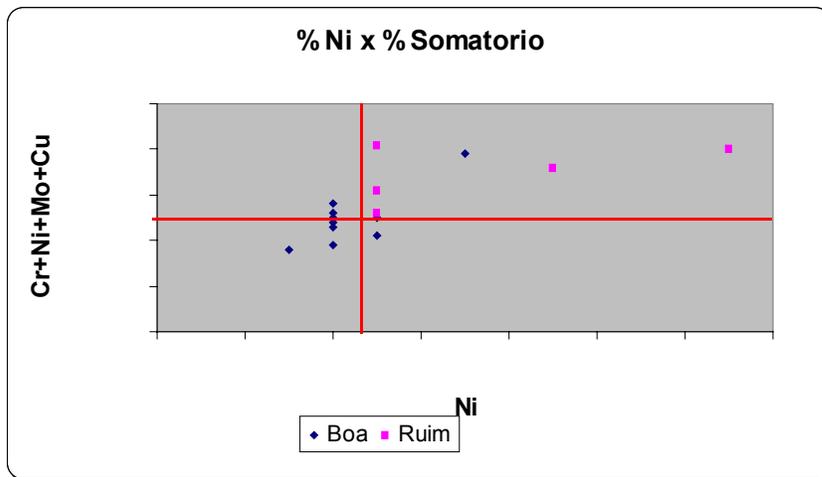


Figura 2. Estratificação %Ni x %Somatorio

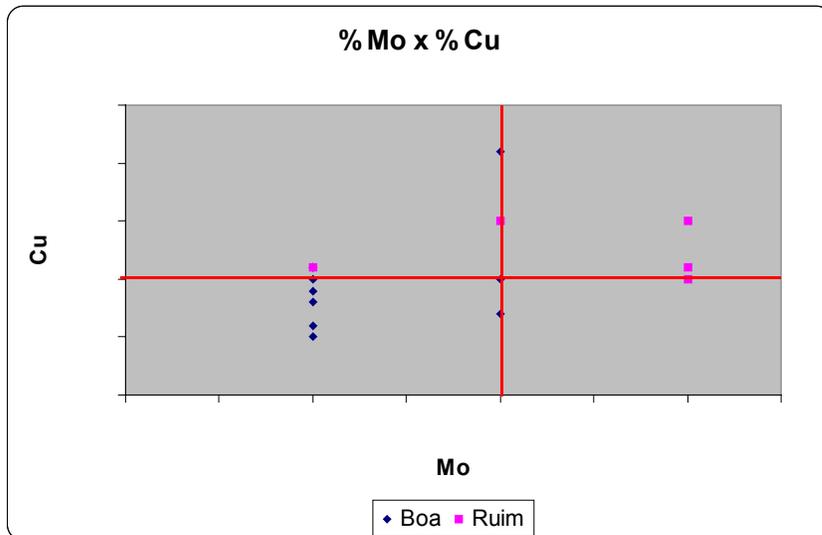


Figura 3. Estratificação %Mo x %Cu

2.2 Análise dos Parâmetros de Laminação

Baseando-se na curva de resfriamento contínuo para o aço SAE 1080 e no perfil de resfriamento atual definiu-se realizar condições experimentais de laminação e resfriamento controlado buscando microestrutura e propriedades mecânicas, similares ao fio máquina após o tratamento térmico de patenteamento. Os fatores estudados foram:

- Temperatura do material na entrada do bloco laminador.
- Temperatura do material no formador de espiras.
- Rotação dos ventiladores na esteira de resfriamento.

Foi elaborada matriz fatorial completa de 3 variáveis a 2 níveis para aplicação de DOE e selecionada para o teste uma corrida considerada ajustada em relação a composição química para realização do experimento, e como réplica, 6 tarugos por experimento.

Matriz para realização do experimento, conforme Tabela 1:

Tabela 1 – Matriz para realização do experimento

Experimento	Temp. entrada bloco		Temp. mat. Formador de espiras		Rotação Ventiladores		Resultado : LR Médio (Mpa)
	-menor	+maior	-menor	+maior	- maior	+menor	
1	-		-		-		LR Médio
2	+		-		-		
3	-		+		-		
4	+		+		-		
5	-		-		+		
6	+		-		+		
7	-		+		+		
8	+		+		+		

Para cada condição testada, avaliou-se os resultados finais obtidos através do ensaio de limite de resistência no fio máquina produzido. Foi considerado o valor médio de 2 amostras retiradas nas extremidades de cada bobina (pé e cabeça da bobina).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são apresentados os resultados obtidos da estratificação gráfica por pontos da composição química e do DOE dos parâmetros de Laminação.

3.1 Composição química

As corridas identificadas com “X” são as que atenderam as áreas identificadas como favoráveis para os elementos residuais na estratificação gráfica e são apresentadas na tabela a seguir (Tabela 2). A existência de % de cumprimento significativamente maior das corridas boas confirma a validade da área favorável com objetivo de deslocar a composição química para estas faixas consideradas boas.

Tabela 2 – Tabela de Cumprimento – Composição Química Áreas Favoráveis

	Corridas boas											Corridas Ruins					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	%	1	2	3	4	5	%
Cu	X	X	X			X		X	X	X	70					X	20
Mo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	100	X		X			40
Ni	X	X	X		X	X	X	X	X	X	90	X			X	X	60
Cr	X	X		X	X	X	X	X	X	X	90	X		X			40
Somat<= 0,25	X	X				X	X	X	X	X	70						0
%	100	100	60	40	60	100	80	100	80	100	-	40	0	40	20	40	-

Os resultados mostram que 3 elementos químicos (Cu, Mo e Cr) e a somatória (Cr+Ni+Cu+Mo), aparecem como parâmetros fundamentais para ajustar o processo. A partir deste resultado, em razão da flutuação natural desses residuais em elaboração por forno elétrico, a composição química foi ajustada de acordo com as áreas favoráveis e capacidade do processo de aciaria.

3.2 Parâmetros de Laminação

A Tabela 3 apresenta o resultado do DOE realizado na laminação de fio máquina com resfriamento controlado. Para cada bobina foram ensaiadas 2 amostras sendo 1 de cada extremidade e o resultado consiste na média dos resultados de 6 bobinas por experimento (12 amostras por experimento).

A Composição química do aço utilizado para o experimento foi a otimizada anteriormente.

Tabela 3 – Resultado DOE Laminação

Experimento	(A) - Temp. entrada bloco		(B) - Temp. mat. Formador de espiras		(C) - Rotação Ventiladores		Resultado : LR Médio (Mpa) 6 réplicas
	-menor	+maior	- menor	+maior	-maior	+menor	
1		-		-		-	1187,9
2		+		-		-	1215,5
3		-		+		-	1161,7
4		+		+		-	1181,6
5		-		-		+	1174,2
6		+		-		+	1134,0
7		-		+		+	1138,1
8		+		+		+	1149,6

Efeitos:

Efeito A: 4,68

Efeito B: -20,17

Efeito C: - 37,72

Efeito A x B: 11,00

Efeito A x C: - 19,02

Efeito B x C: 9,90

Efeito A x B x C: 14,86

Erro Experimental:

Erro experimental estimado pela raiz quadrada da variância global do experimento. $S_p = 25,06$

O ajuste ideal do processo é através da priorização do efeito “rotação dos ventiladores” e de forma contributiva a “temperatura do material no formador de espiras”.

A produtividade manteve-se igual ao arame produzido de fio máquina patenteado.

4 CONCLUSÃO

Através da utilização de ferramentas estatísticas tais como Estratificação Gráfica por pontos e Projeto de Experimentos (DOE) obteve-se o ajuste e balanceamento químico dos residuais da liga (como contribuição aos elementos principais), que associado a um controle de temperatura de laminação e resfriamento, garantiram a manutenção da produtividade de processamento na trefilação em substituição ao tratamento térmico de patenteamento do fio máquina.

REFERÊNCIAS

- 1 ICHIDA, Y. 21st Century Trends in Steel Wire Rod and Bar. Kobelco Technology Review nº25, 03-07, Apr, 2002.
- 2 MORGAN Controlled Temperature Technology for Rod and Bar Cooling. Technical Aspects, Worcester, MA USA.
- 3 NAKAMURA, T. Et al. Wire Journal, 59-68, Jul., 1976.
- 4 YAMADA, Y. Trans. ISIJ, 16:417-26, 1976.
- 5 GODECKI, L. Wire Industry, 518-21, Jun., 1972