

DOE aplicado no processo de têmpera em arames de aço com diâmetro 6,5mm, utilizado para fabricação de molas automobilísticas

Cristie Diego Pimenta (UNESP – SP / Brasil) - pimentadiego@yahoo.com.br
• Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12516-410, Guaratinguetá-SP, fone: (55) 12-3123-2855
Messias Borges Silva (UNESP – SP / Brasil) - messias.silva@feg.unesp.br
Rosinei Batista Ribeiro (FATEA – SP / Brasil) - ispic@fatea.br
Fernando Antonio Elias Claro (UNITAU – SP / Brasil) - fernandoclaro@uol.com.br
Valério Antonio Pamplona Salomon (UNESP – SP / Brasil) - salomon@feg.unesp.br

RESUMO O objetivo desta pesquisa é mostrar a aplicação da metodologia Planejamento de Experimentos (DOE), no estudo das propriedades mecânicas do arame de aço SAE 9254 trefilado, com diâmetro de 6,50mm, e submetido ao processo de têmpera e revenimento. Por meio deste estudo, foram investigadas as variáveis de entrada do processo e as suas influências buscando projetar um modelo estatístico que permitisse prever os resultados do limite de resistência à tração. Os resultados revelaram que todos os fatores estudados foram considerados influentes, no processo, e o modelo obtido foi validado, utilizando-se Análise de Variância (ANOVA). A Regressão Linear Múltipla permitiu representar o processo adequadamente, e a análise gráfica possibilitou visualizar o comportamento da resposta. As previsões realizadas através da utilização do modelo poderão gerar grande impacto, na redução de custos, neste ambiente industrial, tais como: de insumos necessários para a criação de padrões de setup para o tratamento térmico de têmpera, de paradas de processo, de testes laboratoriais e de horas de trabalho de pessoal envolvido nos ensaios laboratoriais.

Palavras-chave Arame de Aço Trefilado. Delineamento de Experimentos. Regressão Linear Múltipla. Têmpera e Revenimento.

ABSTRACT *The purpose of this research is to show the application of Design of Experiments (DOE) methodology in the study of the mechanical properties of SAE 9254 draw steel wires with diameter of 6.50mm after being submitted to the quench hardening and tempering process. For this purpose, process input variables were investigated and their influences and target was to design a statistical model to forecast tensile strength results. The results revealed that all factors are significant and the Analysis of Variance (ANOVA) was employed to validate the design of all statistical models. Multiple Linear Regression made it possible to properly represent the process and graphical analysis was very useful for visualizing response behavior. The predictions undertaken through the use of the model have the potential to generate large-scale impact on cost reductions in this industrial environment such as: necessary supplies for creating standards (setup), thermal treatment quench hardening, process downtime, laboratory testing and number of working hours of staff involved in laboratory tests.*

Keywords *Draw Steel Wire. Design of Experiments. Multiple Regression. Quench Hardening and Tempering.*

1. INTRODUÇÃO

As ligas ferrosas, especialmente os aços, têm importância fundamental na construção mecânica, devido às suas propriedades de resistência mecânica, ductilidade, entre outras. O emprego dessas ligas é bastante diversificado e sua seleção, em geral, muito criteriosa. Para produzi-las com propriedades mecânicas que atendam aos requisitos das aplicações originalmente previstas, é necessário que os principais parâmetros do processo sejam conhecidos e ajustados apropriadamente.

O Delineamento de Experimentos (DOE) é uma metodologia considerada adequada para estudar vários fatores de processo e a complexidade de suas interações, de forma a aumentar a probabilidade de solucionar problemas através de análises estatísticas. Por essa razão, nos últimos anos, ela tem sido aplicada, em diversos segmentos econômicos, principalmente o do setor automobilístico (ILZARBE *et al.*, 2008).

Com o objetivo de investigar a influência de parâmetros do processo sobre as propriedades de ligas de alumínio fundidas, esta metodologia foi empregada com sucesso por Grosselle *et al.* (2010), que utilizaram o Delineamento de Experimentos e Análise de Variância para estabelecer a relação existente entre quatro parâmetros do processo de fundição de ligas de alumínio, três deles testados em dois níveis e um deles com três níveis, para estudos em microestrutura e propriedades mecânicas em manufatura de blocos de motores. Com a execução do planejamento experimental realizado, foi possível equacionar o relacionamento entre as variáveis e entender a contribuição de cada variável, ou de suas interações, sobre os resultados desejados.

Gunasegaram *et al.* (2009) buscaram identificar e estudar os parâmetros de processo que contribuíam para a formação de defeitos de rechupe em um fundido de alumínio de geometria complexa, produzido pelo processo de molde permanente. O Delineamento de Experimentos foi apoiado por simulações numéricas, tendo-se estudado o comportamento de cinco fatores a dois níveis cada. A solução encontrada levou a uma redução de 13% no nível de refugo do produto.

Estudos que abordem a aplicação da mesma metodologia no processo de têmpera e revenimento de arames de aço para molas automobilísticas são, entretanto, relativamente escassos na literatura, o que justifica a presente pesquisa.

No processo em questão, o ajuste inicial (setup) é realizado através do ensaio de resistência à tração de uma amostra-piloto que, após passar por todas as fases de um tratamento térmico de têmpera e revenimento, é encaminhada para a análise em laboratório. Os resultados obtidos, nessa etapa, são usados para configurar a regulagem do forno dentro da qual se faz uma segunda amostra-piloto, posteriormente testada, para confirmar se os ajustes do processo foram suficientes para que o produto atinja as especificações. Essa rotina operacional implica em considerável tempo de análise e de espera, reduzindo a produtividade do processo devido ao baixo rendimento, visto que o forno permanece inoperante até que seja configurado.

Os objetivos desta pesquisa foram estudar a influência dos fatores do processo na variável resposta limite de resistência à tração, assim como, desenvolver a modelagem estatística que substitua a maneira tradicional de erro - tentativa no ajuste do forno de tratamento térmico de têmpera e revenimento.

Esse artigo está organizado da seguinte maneira: na seção 2 encontra-se a revisão bibliográfica abordando os conceitos de têmpera e revenimento, ensaios mecânicos e métodos estatísticos. Na seção 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados neste estudo. Na seção 4, é apresentada a discussão dos resultados. Finalmente, na seção 5, são expostas as conclusões obtidas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processo de têmpera e revenimento

A têmpera está relacionada ao resfriamento brusco do aço após aquecimento à temperatura de austenitização, e tem como objetivo a obtenção de uma microestrutura que proporcione propriedades mecânicas, tais como dureza e limite de resistência elevadas para aplicações específicas que requerem essa condição.

Segundo Callister (2002), durante o estágio de resfriamento na têmpera, a queda de temperatura promove transformações estruturais que acarretam, no surgimento de tensões internas e, por isso, faz-se necessária a realização do revenimento, quando ocorre a transformação da martensita em martensita revenida. O processo de revenimento é realizado complementarmente à têmpera, sendo especialmente importante na fabricação de aços para molas. Ele consiste em aquecer o material temperado entre 250°C e 650°C por um determinado tempo, para aumentar a ductilidade e a elasticidade.

2.2. Ensaio de limite de resistência à tração

Em um teste de tração, o corpo de prova é fixado, no cabeçote de uma máquina de ensaio, que aplica um esforço que tende a alongá-lo até a ruptura, sendo medidas as deformações através de um aparelho chamado extensômetro. O ensaio é realizado, num corpo de prova com dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados, reproduzidos e quantificados na própria máquina. Normalmente, o ensaio ocorre até a ruptura do material e permite medir a resistência do material e a deformação em função da tensão aplicada. Acima de certo nível de tensão, os materiais começam a se deformar plasticamente até que haja a ruptura, ponto em que se obtém o limite de resistência à tração (Mayers; Chawla, 1982).

2.3. Delineamento de experimentos e análise de variância (ANOVA)

Entre os métodos estatísticos pesquisados, encontra-se o Planejamento de Experimentos ou Delineamento de Experimentos (DOE), utilizado para se planejar experimentos e para definir quais dados, e em quais condições devem ser coletados durante a experimentação, objetivando a maior precisão estatística, nos resultados, com o menor custo. É, portanto, um método de extrema importância para a indústria, pois a sua utilização permite resultados muito confiáveis, que podem repercutir em ganhos de produtividade e de qualidade para a empresa.

Montgomery e Runger (2009) afirmam que “planejamentos fatoriais” são frequentemente usados, nos experimentos, envolvendo vários fatores e que “experimentos fatoriais” são a única maneira de descobrir interações entre variáveis de processo.

Segundo Rosa *et al.* (2009) e Robin *et al.* (2010), o delineamento de experimentos é utilizado para definir fatores de entrada e variáveis de resposta, planejar os experimentos e estabelecer a ordem de experimentação para que se obtenham resultados com a maior precisão estatística.

Montgomery (2010) afirma que o planejamento fatorial é largamente utilizado em experimentos envolvendo diversos fatores nos quais seja necessário estudar o efeito de todos eles sobre uma ou mais respostas.

Segundo Neto *et al.* (2007), para executar um planejamento fatorial, devem-se especificar os níveis em que cada fator deverá ser estudado e o mais importante desses casos especiais é chamado de planejamento fatorial 2^k , que utiliza k fatores de dois níveis cada. Nesse tipo de experimento, uma réplica completa requer $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observações.

Também é possível incorporar complementarmente ao Delineamento de Experimentos, a aplicação da razão Sinal – Ruído (S/R), que é uma função logarítmica usada, no Método de Taguchi, para otimizar processos, minimizando a variabilidade. Essa grandeza é derivada da indústria de comunicações, na qual já tem sido utilizada por quase um século, representando a relação entre sensibilidade e variabilidade de um dado sistema de medição. Segundo Souza *et al.* (2011), existem três tipos de relação (S/R):

- Menor é melhor (quanto menor o valor da resposta, melhor é para o processo);
- Maior é melhor (quanto maior o valor da resposta, melhor é para o processo);
- Nominal é melhor (quanto mais próximo da especificação, melhor é para o processo).

A ANOVA é um método estatístico utilizado para interpretar os dados experimentais, nas tomadas de decisões, e para testar estatisticamente as médias dos resultados em suas diferentes condições (MONTGOMERY; RUNGER, 2009). Com a ANOVA, podem-se comparar três ou mais fatores e suas interações, fazendo uso do teste F, para comprovar quais são os fatores realmente significantes no processo (CORREIA; CARDOZA, 2011).

2.4. Regressão linear múltipla

Segundo Benyounis e Olabi (2008), a técnica de Regressão Linear Múltipla é muito eficiente para desenvolver modelos estatísticos que quantificam a influência das variáveis de entrada do processo e para Montgomery e Runger (2009), a Regressão Linear Múltipla é utilizada para situações que envolvam mais de um regressor. O modelo é dado pela Equação 1.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (1)$$

Nessa expressão, Y representa a variável dependente, as variáveis independentes são representadas por x_1, x_2, \dots, x_n e ε é o termo de erro aleatório. O termo “linear” é usado porque a equação é uma função linear dos parâmetros desconhecidos $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ e β_n . Nesse modelo, o parâmetro β_0 é a interseção do plano, β_1, β_2 e β_n são os coeficientes parciais de regressão.

Os modelos que incluem efeitos de interação, segundo Montgomery e Runger (2009), também podem ser analisados pelo método de Regressão Linear Múltipla. Uma interação entre duas variáveis pode ser representada por um termo cruzado, pois se admitirmos que $x_3 = x_1 x_2$ e $\beta_3 = \beta_{12}$, então, o modelo incluindo termos de interação ficará como apresentado na Equação 2.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \varepsilon \quad (2)$$

Os termos quadráticos e de interação, nos modelos, podem produzir uma função formando uma curvatura (veja Equação 3), chamado modelo de 2ª ordem. Dependendo dos valores dos coeficientes de regressão, o modelo de segunda ordem com interação é capaz de considerar uma ampla variedade de formas (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_n x_1^2 + \beta_n x_2^2 + \beta_n x_3 + \dots + \varepsilon \quad (3)$$

O coeficiente de determinação múltipla (R^2) é uma medida da quantidade de redução, na variabilidade de Y , obtida pelo uso dos regressores $x_1, x_2 \dots x_k$. O intervalo de variação deste coeficiente é de zero a um ($0 \leq R^2 \leq 1$). Se o valor de R^2 for próximo de um, isso significa que as diversas variáveis x medidas são responsáveis quase que totalmente pela variabilidade de Y . Caso contrário, R^2 apresentará um valor próximo à zero (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

3. MATERIAL E MÉTODO DA PESQUISA

3.1. Características do material testado

O material usado neste estudo foi o arame de aço SAE 9254 trefilado a frio, utilizado para fabricação de molas para o segmento automobilístico, com bitola de 6,50mm, submetido ao processo de têmpera e revenimento.

A análise química do material SAE 9254 usado, no estudo, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química (SAE 9254).

Elementos Químicos	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V
(%)	0,554	0,64	1,22	0,022	0,018	0,58	0,04	0,03	0,01	0,009	0,005

Fonte: Elaboração dos autores (2013).

3.2. Características específicas do processo

As características específicas desse processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento serão descritas a seguir:

- Na primeira fase (zona de entrada do forno), existem dez canais de engate por onde se inserem as bobinas de arame, nas quais o arame de aço encontra-se com uma estrutura bruta de trefilação (ferrita + perlita fina).
- Na segunda fase, denominada como “Austenitização”, o material passa por cinco zonas de temperaturas variando em torno de 900°C, em que ocorre a austenitização.
- Na terceira etapa do processo, o arame de aço é mergulhado em polímero líquido (meio de têmpera) em que a sua estrutura é transformada em martensita e, em seguida, é mergulhado em chumbo líquido para ser revenido, com temperaturas variando de 400°C a 480°C, com a finalidade de remoção das tensões superficiais e transformação da sua estrutura para martensita revenida.
- Na última fase do processo, o arame de aço é mergulhado em um tanque de óleo protetivo (antioxidante).

3.3. Seleção dos fatores e planejamento dos experimentos

O conhecimento histórico existente sobre o processo indicava que muitos fatores poderiam influenciar nas propriedades mecânicas do arame de aço trefilado, submetido ao processo de têmpera e revenimento, entre eles:

- A composição química da matéria-prima utilizada;
- O diâmetro do arame, que afeta a profundidade de têmpera;
- A temperatura de saída do ciclo de aquecimento (temperatura pré-têmpera) do arame que irá determinar a severidade do choque térmico no meio de têmpera (polímero líquido);
- O sistema de medição das propriedades mecânicas do aço, que podem proporcionar variações dos valores medidos;
- A velocidade de passagem do arame dentro do forno, isto é, o tempo de exposição do material ao processo de têmpera e revenimento;
- A temperatura e concentração do polímero (meio de têmpera), que podem aumentar ou reduzir a severidade da têmpera;
- A temperatura do chumbo líquido usado no revenimento.

Após experimentos exploratórios preliminares e para tornar a experimentação viável economicamente, sem colocar em risco as conclusões obtidas, optou-se por deixar a margem do Planejamento Experimental os seguintes fatores:

- A composição química e diâmetro do arame de aço usados, no experimento, são os mesmos usados na manufatura do produto mais relevante em vendas para empresa financiadora da pesquisa, ou seja, somente será utilizado o aço SAE 9254, para diâmetro 6,50 mm;
- A temperatura de pré-têmpera foi ajustada em um único valor, rotineiramente usado, para processamento deste produto;
- A temperatura do polímero (meio de têmpera) foi ajustada para a faixa 30°C a 35°C.

Para minimizar uma possível interferência indesejável do sistema de medição nos resultados criou-se uma padronização operacional do trabalho e utilizou-se somente uma máquina calibrada e certificada para medições. Com isso, os fatores investigados através da metodologia Planejamento de Experimentos, nesta pesquisa, foram:

- Velocidade de passagem do arame dentro do forno (em m/s);
- Temperatura do chumbo no revenimento (em °C);
- Concentração do polímero, meio de têmpera (em %).

Os fatores velocidade, temperatura do chumbo e concentração do polímero, foram experimentados através do Planejamento Fatorial completo, utilizando uma matriz 23, somente para o diâmetro 6,50mm. Também foi possível testar os pontos centrais (representado por zero (0) na matriz), ou seja, para cada fator, além de serem testados os ajustes mínimos (-) e máximos (+), também foi testado o ponto médio (ponto central) e, dessa forma, será possível testar a significância da curvatura para a matriz experimental 23, que irá definir a necessidade ou não de uma modelagem quadrática desse processo, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Matriz fatorial completa 23.

Experimentos	Velocidade	Temperatura chumbo	% Polímero
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+
Ponto central	0	0	0

Fonte: Elaboração dos autores (2013).

Para a realização do Planejamento de Experimentos, foram utilizadas variáveis reduzidas (β) ao invés de variáveis físicas (ajustes reais) dos fatores investigados, de forma a se preservarem os dados confidenciais da empresa financiadora da pesquisa. A redução das variáveis foi calculada segundo Montgomery e Runger (2009), utilizando o valor físico (α) que se quer testar subtraído da média (μ) entre os valores mínimo, médio e máximo dos ajustes dos fatores. O resultado dividiu-se pela metade da amplitude (R) entre os valores mínimos e máximos dos ajustes dos fatores. Dessa forma, a dimensionalidade das variáveis reduzidas ficou restrita ao intervalo [-1 a 1], que concentra os valores mínimo, médio e máximo, reduzidos dos ajustes dos fatores testados, conforme Equação 4 e Tabela 3.

$$\beta = \frac{\alpha - \mu}{\frac{R}{2}} \quad (4)$$

Tabela 3 – Transformação de variáveis físicas para variáveis reduzidas.

Variáveis de entrada	Valores (unidades físicas)	Valores (variáveis reduzidas)
Velocidade (m/s)	Mínimo / Médio / Máximo	-1 / 0 / 1
Temperatura do Chumbo (°C)	Mínimo / Médio / Máximo	-1 / 0 / 1
Concentração do polímero (%)	Mínimo / Médio / Máximo	-1 / 0 / 1

Fonte: Elaboração dos autores (2013).

3.4. Execução experimental e resultados obtidos

Foram realizadas seis réplicas para cada condição experimental, e outras seis para testar o ponto central. As replicações foram aleatorizadas e sequenciadas, utilizando uma numeração de 1 a 9, correspondente à ordem de realização de cada experimento. Essa sequência de experimentação é apresentada entre parênteses e em formato subscrito ao lado dos valores obtidos da propriedade mecânica, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados do limite de resistência à tração (MPa).

Experimentos	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6
1	1968 ⁽⁹⁾	1974 ⁽¹⁾	1962 ⁽³⁾	1971 ⁽⁴⁾	1971 ⁽⁹⁾	1974 ⁽⁵⁾
2	1980 ⁽⁷⁾	1976 ⁽⁴⁾	1988 ⁽⁶⁾	1978 ⁽²⁾	1980 ⁽³⁾	1988 ⁽²⁾
3	1771 ⁽³⁾	1764 ⁽³⁾	1763 ⁽⁷⁾	1773 ⁽⁵⁾	1771 ⁽⁵⁾	1764 ⁽⁴⁾
4	1796 ⁽⁸⁾	1784 ⁽²⁾	1797 ⁽⁸⁾	1781 ⁽⁹⁾	1796 ⁽²⁾	1784 ⁽⁹⁾
5	1949 ⁽⁵⁾	1963 ⁽⁶⁾	1947 ⁽¹⁾	1951 ⁽¹⁾	1949 ⁽⁴⁾	1947 ⁽⁶⁾
6	1992 ⁽⁴⁾	1980 ⁽⁵⁾	1976 ⁽⁹⁾	1994 ⁽⁸⁾	1980 ⁽⁷⁾	1992 ⁽⁷⁾
7	1760 ⁽²⁾	1768 ⁽⁷⁾	1766 ⁽⁵⁾	1763 ⁽⁷⁾	1766 ⁽⁶⁾	1763 ⁽⁸⁾
8	1787 ⁽⁶⁾	1793 ⁽⁸⁾	1785 ⁽²⁾	1784 ⁽⁶⁾	1784 ⁽¹⁾	1785 ⁽¹⁾
Ponto central	1850 ⁽¹⁾	1847 ⁽⁹⁾	1849 ⁽⁴⁾	1848 ⁽³⁾	1844 ⁽⁸⁾	1846 ⁽³⁾

Fonte: Elaboração dos autores (2013).

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A significância dos fatores foi testada a um nível de 95% de confiança ($p < 0,05$) e os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Teste de significância para limite de resistência (em MPa).

Termos	Efeito	Coefficiente	T	p
Constante		1874,54	2492,90	0,000
(A)	22,58	11,29	15,02	0,000
(B)	-195,08	-97,54	-129,72	0,000
(C)	-5,42	-2,71	-3,60	0,001
(A)(B)	-0,58	-0,29	-0,39	0,700
(A)(C)	5,75	2,87	3,82	0,000
(B)(C)	2,08	1,04	1,39	0,173
(A)(B)(C)	-5,75	-2,88	-3,82	0,000
Curvatura		-27,21	-12,06	0,000

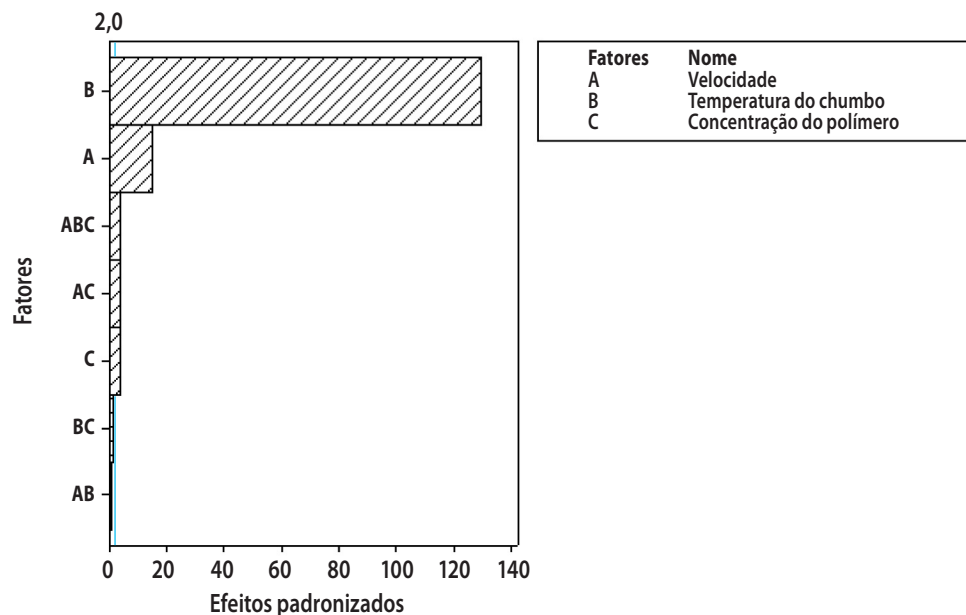
Fonte: Elaboração dos autores (2013).

Através do teste de significância apresentado na Tabela 5, foi constatado que a curvatura é influente e os fatores e interações significativas (onde $p < 0,05$) são: velocidade (representada pela letra A), temperatura do chumbo (representado pela letra B), concentração do polímero (representada pela letra C), interação de segunda ordem entre velocidade e concentração do polímero e uma interação de terceira ordem entre velocidade, temperatura de chumbo e concentração do polímero. Também foi calculado o coeficiente de determinação de 99,69% e o desvio-padrão de 5,20 MPa.

Analisando o valor do coeficiente de determinação (R^2), conforme critério estabelecido por Montgomery (2009), é possível afirmar que a correlação poderá ser considerada forte, pois as diversas variáveis independentes medidas, são responsáveis quase que totalmente pela variabilidade da variável resposta. O valor do desvio padrão foi considerado pequeno, pois a própria variação de repetitividade e reprodutibilidade do instrumento de medição utilizado é superior ao valor do desvio.

A análise gráfica revela que embora todos os fatores sejam significativos para a obtenção das propriedades mecânicas, a temperatura do chumbo (fator B) destaca-se por possuir maior significância em relação aos outros (Figura 1). No eixo horizontal, plotam-se os valores dos efeitos padronizados através da estatística "T" para cada fator e, no eixo vertical, estão representados os fatores. O valor crítico é $T=2,0$ e sempre que o valor da estatística T de cada efeito supera este valor (crítico) para 95% de confiança, ele é dito ser significativo.

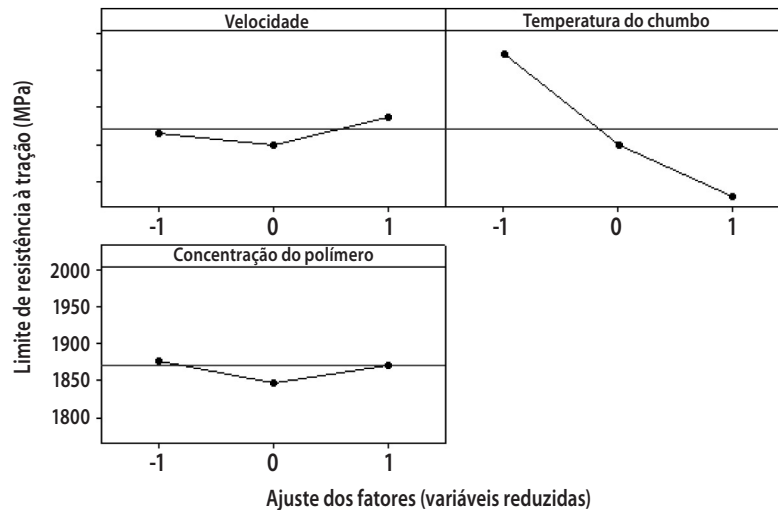
Figura 1 – Influência dos fatores na resposta limite de resistência à tração.



Fonte: Elaboração dos autores (2013).

A média dos efeitos em relação à resposta limite de resistência à tração é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Média dos efeitos sobre o limite de resistência à tração.



Fonte: Elaboração dos autores (2013).

Analisando essa Figura 2, é possível constatar que os ajustes dos fatores que proporcionam aumento no limite de resistência à tração são:

- Velocidade no nível 1;
- Temperatura do chumbo no nível -1;
- Concentração do polímero no nível -1.

Utilizando os coeficientes calculados através do teste de significância, em que LR corresponde à variável resposta limite de resistência à tração, foi possível a construção do modelo estatístico que representa a relação entre as variáveis de entrada do processo (fatores) e a variável limite de resistência à tração. Esse modelo é apresentado na Equação 5.

$$LR = 1874,54 + 11,29(A) - 97,54(B) - 2,71(C) + 2,87(A)(C) - 2,88(A)(B)(C) \quad (5)$$

Além da análise de significância utilizada para cálculos de coeficientes para o modelo e para calcular a influência dos fatores, também foi realizada análise de variância (ANOVA) para validar o modelo estatístico, conforme Tabela 6. Essa validação tornou-se necessária devido à constatação da influência significativa da curvatura. Foi possível observar que o modelo linear e linear com termos de interação até 3ª ordem possui influência equivalente (significância $p < 0,05$) ao modelo de segunda ordem (quadrático).

Tabela 6 – Análise de variância para validação do modelo estatístico.

Modelos de regressão	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F	p
Linear	3	463162	154,387	5688,40	0,000
Quadrática	1	3948	3948	145,47	0,000
Interação 2ª	3	453	151	5,56	0,002
Interação 3ª	1	397	397	14,62	0,000
Erro residual	45	1221	27,13		

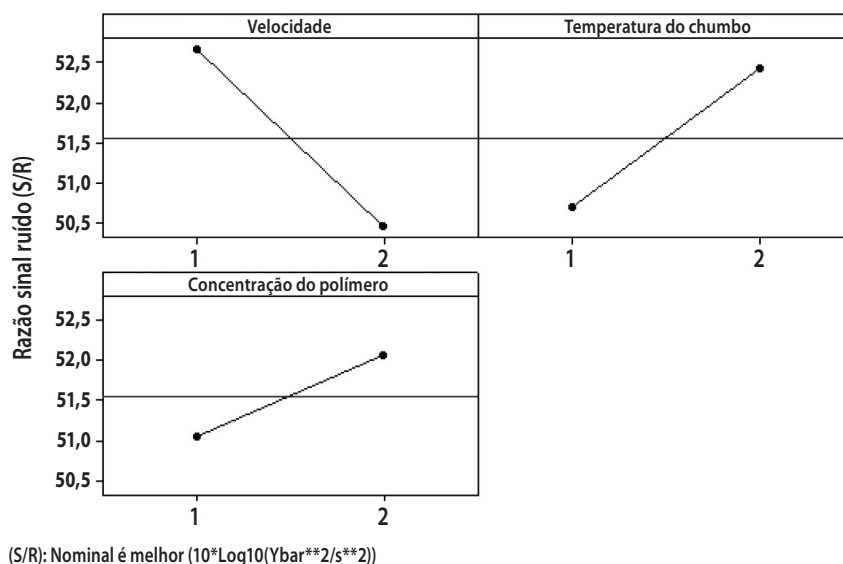
Fonte: Elaboração dos autores (2013).

Utilizando critério baseado na ANOVA, o modelo linear incluindo os termos de interações até 3ª ordem, mostrado, na Equação 5 (já apresentada), foi escolhido para representar o processo de têmpera e revenimento.

Com o objetivo de medir a variação entre os fatores, foi calculada a razão (S/R), seguindo-se a metodologia proposta por Phadke (1989) e Souza *et al.* (2011). A relação “Nominal é melhor” foi adotada, neste estudo, pois, nesse caso, a melhor condição de ajuste dos fatores é o atendimento do valor nominal da especificação.

Através da razão (S/R), constatou-se que os ajustes dos fatores que proporcionam menor variação foram: fator A, velocidade, no nível 1; fator B, temperatura do chumbo, no nível 2; fator C, concentração do polímero, no nível 2 (Figura 3). A razão (S/R), segundo Phadke (1989), possui relação inversamente proporcional com a variação, ou seja, quanto maior o seu valor, menor será a variabilidade da condição experimental do processo.

Figura 3 – Efeito da média dos fatores sobre a Razão-sinal ruído (S/R).



Fonte: Elaboração dos autores (2013).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do Planejamento de Experimentos proporcionou compreender melhor a influência dos fatores e interações, na propriedade mecânica limite de resistência do arame de aço SAE 9254, com diâmetro de 6,50mm, depois de submetido ao tratamento térmico por têmpera e revenimento.

Concluiu-se que a utilização desses métodos foi de fundamental importância para a elaboração do modelo estatístico, que poderá proporcionar previsões dos resultados de limite de resistência à tração nas diversas condições experimentais dentro dos intervalos testados.

A regressão linear múltipla permitiu representar o processo adequadamente, e a análise gráfica possibilitou visualizar o comportamento da resposta. As previsões realizadas através da utilização do modelo poderão gerar grande impacto na redução de custos nesse ambiente industrial, tais como: de insumos necessários para o ajuste (setup), do forno de tratamento térmico de têmpera, de paradas de processo, de testes laboratoriais e de horas de trabalho de pessoal envolvido nos ensaios laboratoriais. Dessa forma, será possível, quando desejado pela empresa, a substituição dos métodos tradicionais de testes executados em laboratório pelo modelo estatístico auxiliado por tecnologia computacional, podendo isso repercutir significativamente em aumento da qualidade e produtividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENYOUNIS, K. Y.; OLABI, A. G. **Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches** – A reference guide, Science Direct, v.39, p. 483–496, 2008.

CALLISTER JR, W. D. **Uma introdução à engenharia e a ciências dos materiais**, 5ª edição, editora LTC, 2002, p.589.

CORREIA, E. A. S.; CARDOZA, J. A. S. Planejamento de experimentos no processo produtivo utilizando o método Taguchi, **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Ano 6, n.1, p. 55–66, jan./mar., 2011.

GROSSELLE, F.; TIMELLI, G.; BONOLLO, F. Doe applied to microstructural and mechanical properties of Al–Si–Cu–Mg, **Journal Materials Science and Engineering**, v.527, p. 3536–3545, 2010.

GUNASEGARAM, D. R. ; FARNSWORTH, D. J.; NGUYENA, T. T. Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design of experiments, **Journal of Materials Processing Technology**, v.209, p. 1209–1219, 2009.

ILZARBE, L.; ALVAREZ, M. J.; VILES, E.; TANCO, M. Practical applications of design of experiments in the field of engineering: A bibliographical review; **Quality and Reliability Engineering International**, v. 24, p. 417–428, 2008.

MAYERS, A. M.; CHAWLA, K. K. **Princípios de metalurgia mecânica**, 2ª edição, Edgard Blucher, 1982, 422 p.

MONTGOMERY, C. D. **Design and analysis of experiments**, 7th edition, John Wiley & Sons, 2010, 203p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**, 4ª edição, LTC, 2009, 514 p.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**, 3ª edição, editora Unicamp, 2007, 480 p.

PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**, 1st edition, New York, Prentice Hall, 1989, 333 p.

ROSA, J. L.; ROBIN, A.; SILVA, M. B.; BALDAN, C. A.; PERES, M. P. Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach, **Journal of Materials Processing Technology**, v.209, p. 1181-1188, 2009.

SOUZA, H. J. C.; MOYSES, C. B.; PONTES, F. J.; DUARTE, R. N.; SILVA, C. E. S.; ALBERTO, F. L.; FERREIRA, U. R.; SILVA, M. B. Optimization Molecular assay optimized by Taguchi experimental design method for venous thromboembolism investigation, **Molecular and Cellular Probes**, v.25, p. 231-237, 2011.