



Cristie Diego Pimenta <sup>(a)</sup>, Messias Borges Silva <sup>(b)</sup>,  
Antônio Fernando Branco Costa <sup>(c)</sup>, Valério Antonio Pamplona Salomon <sup>(d)</sup>

(a) Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, Brasil / pimentadiego@yahoo.com.br

(b) Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, Brasil / messias.silva@feg.unesp.br

(c) Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, Brasil/ fbranco@feg.unesp.br

(d) Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, Brasil / salomon@feg.unesp.br

## **OTIMIZAÇÃO E ESCOLHA DE MODELOS PROBABILÍSTICOS NO PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO EM ARAMES DE AÇO TEMPERADOS E REVENIDOS**

### **RESUMO**

*O objetivo deste artigo foi comparar a eficiência dos métodos de otimização Simplex e Simulação de Monte Carlo e modelar estatisticamente o processo de têmpera e revenimento, em arames de aço trefilados SAE 9254. Os dados foram gerados a partir da aplicação da metodologia Delineamento de Experimentos, com análise em blocos. Os resultados revelaram que todas as variáveis consideradas no estudo têm influência significativa na obtenção das propriedades mecânicas investigadas. A modelagem estatística foi realizada através da aplicação do método de Regressão Linear Múltipla, que permitiu a obtenção de modelos que representam adequadamente o processo. Concluiu-se que a predição dos resultados e otimização das múltiplas respostas simultaneamente possibilitaram boa eficiência no atendimento às especificações requeridas, permitindo que através de simulações de resultados, seja possível atender de forma precisa as necessidades de produção através do ajuste adequado da configuração (setup) do forno de têmpera.*

*Palavras-chave: Delineamento de Experimentos; Regressão Linear Múltipla; Simplex; Simulação de Monte Carlo.*

## **OPTIMIZATION AND CHOICE OF PROBABILISTIC MODELS IN THE PROCESS OF HEAT TREATMENT IN QUENCHED AND TEMPERED STEEL WIRES**

### **ABSTRACT**

*The objective of this article was to compare the efficiency of the Simplex method and Monte Carlo simulation for optimization and to model statistically the quench hardening and tempering processes in SAE 9254 draw steel wires. The data were generated by the application of Design of Experiments methodology, with blocks analysis. The results revealed that all variables considered in study have significant influence in obtaining the investigated mechanical properties. Statistic modeling was carried out by means of application of the Multiple Linear Regression method which allowed obtaining models which properly represent the process itself. It was concluded that the prediction of the results and optimization of the Multiple Responses simultaneously allowed greater efficiency in achieving the required specifications, enabling that through the simulations of results, it is possible to precisely meet the needs of production process through the appropriate adjusting of the setup of the quench hardening furnace.*

*Keywords: Design of experiments; Multiple Linear Regression; Simplex; Monte Carlo Simulation*

## 1. Introdução

O objetivo deste trabalho foi comparar a eficiência dos métodos de otimização *Simplex* e Simulação de Monte Carlo e modelar estatisticamente o processo de têmpera e revenimento em arames de aço trefilados SAE 9254. Para o levantamento dos dados e modelagem estatística do processo, foram utilizadas as metodologias Delineamento de Experimentos e Regressão Linear Múltipla. Para otimização foram aplicados os métodos *Simplex* e simulação de Monte Carlo. Nesse caso, esses métodos foram usados para auxiliar, no desenvolvimento de uma modelagem estatística, a substituição da maneira tradicional de ajustar as variáveis de entrada do processo de tratamento térmico. O *setup* desse processo, atualmente, é realizado através de ensaios mecânicos de amostras-piloto que, após passar por todas as fases de um tratamento térmico de têmpera e revenimento, são encaminhadas para análise em laboratório. Os resultados obtidos, nessa etapa, são usados para regular o forno de têmpera, implicando em considerável tempo de análise e de espera, reduzindo, conseqüentemente, a produtividade do processo.

Blondeau, Dollet e Vieillard-Baron (2000), demonstraram a aplicação de modelos matemáticos regressivos na predição das propriedades mecânicas em barras de aços. Apesar de esse modelo ter apresentado bons resultados em barras, a pesquisa em questão trata de arames trefilados, que possuem características muito diferentes. Hodgson e Gibbs (1992) comprovaram a influência dos elementos químicos C e Mn nas propriedades mecânicas em barras de aço, assim como a modelagem matemática para esse processo, também restrito a barras de aço.

Ribeiro (2006), afirmou que as propriedades mecânicas do aço SAE 4140 foram influenciadas pelos parâmetros de revenido, em particular pela temperatura e tempo de tratamento. Também foi observada em Gorni (2001), a afirmação de que a temperatura de reaquecimento influenciou no limite de resistência de ambos os materiais testados.

Segundo Camarão (1998), as propriedades mecânicas foram totalmente influenciadas pela temperatura de têmpera. Stein (2004) constatou que a rápida austenitização afeta sensivelmente as propriedades mecânicas e a microestrutura dos aços com teor de carbono acima de 0,4%, na condição de temperado e revenido, assim como se estudou o efeito da rápida austenitização sobre as propriedades mecânicas de um aço

1045, na condição de temperado e revenido. As variáveis experimentais utilizadas foram: as temperaturas de austenitização (intervalos de tempos de encharque e de revenimento) e a temperatura de austenitização e de revenimento.

Através das pesquisas citadas anteriormente, foi possível obter algumas hipóteses de quais fatores podem influenciar no processo de têmpera e revenimento. Todavia, todos os artigos e dissertações anteriormente citados referem-se a barras de aço.

A justificativa deste trabalho se dá pela falta de aplicações de planejamentos de experimentos relacionados ao processo de têmpera e revenimento em arames de aço SAE 9254, assim como a falta de modelos matemáticos que expressem com eficácia os resultados das propriedades mecânicas, visto que cada processo de tratamento térmico possui suas características específicas, dependendo das variações inerentes nas diferentes empresas. Não é conhecido na literatura nenhum modelo que represente adequadamente o processo de têmpera e revenimento para esse material estudado.

Objetivou-se, por meio da aplicação dos métodos *Simplex* e simulação de Monte Carlo, a otimização, de forma simultânea, das variáveis respostas limite de resistência à tração, estrição e dureza. A simulação computacional dos resultados dessas propriedades mecânicas poderá possibilitar as predições de resultados mecânicos e ajustes prévios dos fatores com intuito de atingir as especificações. Isso terá implicação direta na redução de custos com testes laboratoriais e tempo utilizado nos ensaios e poderá proporcionar ganho de produtividade nos fornos de têmpera.

## 2. Revisão Bibliográfica

Segundo Callister (2012), a queda de temperatura durante o resfriamento na têmpera, promove transformações estruturais que acarretam o surgimento de tensões internas e por isso se faz necessário o tratamento de revenimento, que é realizado complementarmente à têmpera, sendo especialmente importante na fabricação de aços para molas. Este processo consiste em aquecer o material temperado entre 250 °C e 650 °C por um determinado tempo, para aumentar a ductilidade e elasticidade do material.

Em um teste de limite de resistência à 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 por meio 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 (o que o classifica como destrutivo) e permite medir a resistência do material e a deformação em função da tensão aplicada.

Essa variação é extremamente útil para engenharia e é determinada pelo traçado da curva tensão-deformação. 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 (CHIAVERINI, 2012).

Nas indústrias siderúrgicas é muito utilizada a máquina de ensaio universal de tração e é comum que as unidades de força utilizadas sejam quilograma-força por milímetro quadrado ( $\text{kgf/mm}^2$ ) ou Megapascal (MPa). As normas técnicas mais utilizadas para a execução de ensaios mecânicos são elaboradas pelas organizações ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Estricção é definida como o atributo apresentado por certos materiais ao sofrerem grandes transformações plásticas antes de seu rompimento quando submetidos à tensão de tração. Em corpos de prova de aço a estricção é medida pela redução de área da seção transversal que ocorre antes da ruptura. A estricção é dada pelo quociente entre a variação da área transversal do corpo de prova:  $(\text{área inicial} - \text{área final}) / \text{área inicial}$ . A estricção ou redução de área normalmente é expressa em porcentagem, mostrando quanto da área transversal da seção resistiva do corpo de prova foi reduzida após a aplicação da força no ensaio de limite de resistência à tração (MAYERS; CHAWLA, 1982).

Segundo Chiaverini (2012), a dureza é a medida da resistência de um metal à penetração. Os métodos mais comuns de se determinar a dureza de um metal são o Brinell, o Vickers e o Rockwell.

As propriedades mecânicas dureza e limite de resistência à tração estão diretamente relacionadas. Em geral, quanto maior a dureza, maior será o limite de resistência à tração. Como frequentemente a dureza é proporcional à resistência ao desgaste e durabilidade nos aços, ela é utilizada como uma forma de medir a resistência à abrasão (PAULA, 2013).

### 3. Material e Método

Para Silva e Silva (2008), Lima *et al.* (2011) e Granato *et al.* (2011) o delineamento de experimentos é uma metodologia considerada poderosa para a melhoria da qualidade e produtividade em processos industriais, sendo muito adequada para estudar vários fatores de processo e a complexidade de suas interações.

Segundo Montgomery (2013), a blocagem é uma técnica de projeto usada para melhorar a precisão da comparação entre fatores de interesse. Ela pode ser empregada em planejamentos fatoriais quando houver a necessidade de controlar a variabilidade proveniente de fontes perturbadoras conhecidas, que podem influir nos resultados.

Segundo Sodré (2007), um modelo matemático consiste de um conjunto de equações que representam de uma forma quantitativa, as hipóteses que foram usadas na construção do modelo. Os parâmetros gerados para a modelagem utilizando o método de Regressão Linear Múltipla podem ser calculados por meio da utilização de estatística *t-student*, que quando utilizada complementarmente ao Planejamento de Experimentos, é muito eficiente para desenvolver modelos estatísticos que quantificam a influência das variáveis de entrada do processo para predição das variáveis de saída (Benyounis e Olabi, 2008).

O método de programação linear tem por objetivo encontrar a melhor solução para problemas que tenham seus modelos representados por expressões lineares. Consiste na maximização ou minimização de uma função objetivo, respeitando um sistema de igualdades ou desigualdades, que recebem o nome de restrições do modelo. Essas restrições determinam uma região na qual se dá o nome de soluções viáveis (MARINS, 2011).

Segundo Marins (2011), o método *Simplex* é um método de programação linear, que fornece um resultado para qualquer modelo linear, podendo ser utilizado para a sua aplicação, o solver do *Excel* que atua com planilhas eletrônicas e indica se o modelo tem solução ilimitada, se não tem solução, ou se possui infinitas soluções.

A simulação de Monte Carlo foi criada por John Von Neumann, matemático húngaro, durante a segunda guerra mundial, em seu trabalho no projeto Manhattan (bomba atômica). O trabalho consistia na simulação direta de problemas probabilísticos (estocásticos) relacionados com a difusão das partículas de nêutrons quando submetidos a um processo de

fissão nuclear. O nome Monte Carlo foi cunhado pelo cientista Nicholas Metropolis em 1953, inspirado no seu interesse por pôquer. Baseou-se na similaridade que a simulação estatística desenvolvida por eles tinha com jogos de azar, simbolizadas nas roletas de cassino de Monte Carlo, na capital do principado de Mônaco.

O alicerce do método de Monte Carlo se baseia na geração de números aleatórios para simular sistemas físicos ou matemáticos, nos quais não se considera o tempo como explicitamente uma variável (CORRAR e THEÓPHILO, 2004).

O material utilizado neste estudo foi o arame de aço SAE 9254, com diâmetros de 2,00 mm e 6,50 mm. Os fatores investigados, nesta pesquisa, foram:

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

O diâmetro do arame de aço também foi considerado como um fator importante, pois existia a hipótese de que sua massa pudesse influenciar nos resultados das propriedades mecânicas investigadas. Nesta pesquisa, porém, foi utilizada a metodologia de análise em blocos, ou seja, para o bloco 1 foram alocados os experimentos relacionados somente ao diâmetro de 2,00 mm e, para o bloco 2, os experimentos relacionados ao diâmetro de 6,50 mm.

Os fatores velocidade, temperatura do chumbo e concentração do polímero foram experimentados através dos planejamentos fatoriais, utilizando a matriz  $2^3$ , conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz fatorial  $2^3$

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

Fonte: os autores

Para a realização do planejamento de experimentos, foram utilizadas variáveis reduzidas ( $\beta$ ) 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 (2003), utilizando o valor físico ( $\alpha$ ) que se quer testar subtraído da média ( $\mu$ ) entre os valores mínimo e máximo, com intervalo [-1,+1] 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,+1], conforme equação 1 e Tabela 2.

$$\beta = \frac{\alpha - \mu}{\frac{R}{2}} \quad (1)$$

Tabela 2 – Transformação de variáveis físicas para variáveis reduzidas

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

Fonte: os autores

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1. Experimentos e análises

Na experimentação, foram realizadas, inicialmente, todas as réplicas relacionadas ao bloco 1 e, em seguida, as correspondentes ao bloco 2. Seis réplicas foram utilizadas para cada condição experimental, pois se entendeu que essa quantidade de réplicas seria importante para uma análise correta dos resultados.

Pode-se assim, obter diversas medições nas mesmas condições de ajustes dos fatores, o que poderia proporcionar uma boa estimativa do erro experimental. As replicações foram aleatorizadas e sequenciadas, utilizando uma numeração de 1 a 8, correspondente à ordem de realização de cada experimento, para cada bloco individualmente.

Essa sequência de experimentação é apresentada entre parênteses e em formato subscrito ao lado dos valores obtidos das propriedades mecânicas conforme mostrado nas Tabelas 3, 4 e 5. É possível observar, ainda, que para cada condição experimental, determinaram-se os valores das três propriedades mecânicas estudadas, correspondentes a cada réplica realizada.

Tabela 3 – Resultados de tração (MPa)

Experimentos	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6
1/Bloco 1	2149 <sup>(1)</sup>	2148 <sup>(1)</sup>	2146 <sup>(2)</sup>	2161 <sup>(8)</sup>	2167 <sup>(1)</sup>	2160 <sup>(6)</sup>
2/Bloco 1	2157 <sup>(4)</sup>	2155 <sup>(7)</sup>	2157 <sup>(3)</sup>	2151 <sup>(7)</sup>	2157 <sup>(4)</sup>	2157 <sup>(2)</sup>
3/Bloco 1	1924 <sup>(3)</sup>	1922 <sup>(3)</sup>	1920 <sup>(1)</sup>	1921 <sup>(5)</sup>	1920 <sup>(6)</sup>	1918 <sup>(4)</sup>
4/Bloco 1	1924 <sup>(2)</sup>	1924 <sup>(8)</sup>	1922 <sup>(8)</sup>	1943 <sup>(6)</sup>	1945 <sup>(8)</sup>	1945 <sup>(5)</sup>
5/Bloco 1	2108 <sup>(6)</sup>	2106 <sup>(5)</sup>	2108 <sup>(7)</sup>	2104 <sup>(2)</sup>	2102 <sup>(7)</sup>	2109 <sup>(8)</sup>
6/Bloco 1	2136 <sup>(5)</sup>	2127 <sup>(4)</sup>	2127 <sup>(4)</sup>	2136 <sup>(3)</sup>	2134 <sup>(3)</sup>	2127 <sup>(3)</sup>
7/Bloco 1	1927 <sup>(7)</sup>	1926 <sup>(2)</sup>	1944 <sup>(5)</sup>	1935 <sup>(4)</sup>	1946 <sup>(2)</sup>	1947 <sup>(7)</sup>
8/Bloco 1	1946 <sup>(8)</sup>	1946 <sup>(6)</sup>	1946 <sup>(6)</sup>	1953 <sup>(1)</sup>	1951 <sup>(5)</sup>	1946 <sup>(1)</sup>
1/Bloco 2	1968 <sup>(1)</sup>	1974 <sup>(1)</sup>	1962 <sup>(3)</sup>	1971 <sup>(4)</sup>	1971 <sup>(8)</sup>	1974 <sup>(5)</sup>
2/Bloco 2	1980 <sup>(7)</sup>	1976 <sup>(4)</sup>	1988 <sup>(6)</sup>	1978 <sup>(2)</sup>	1980 <sup>(3)</sup>	1988 <sup>(2)</sup>
3/Bloco 2	1771 <sup>(3)</sup>	1764 <sup>(3)</sup>	1763 <sup>(7)</sup>	1773 <sup>(5)</sup>	1771 <sup>(5)</sup>	1764 <sup>(4)</sup>
4/Bloco 2	1796 <sup>(8)</sup>	1784 <sup>(2)</sup>	1797 <sup>(8)</sup>	1781 <sup>(3)</sup>	1796 <sup>(2)</sup>	1784 <sup>(3)</sup>
5/Bloco 2	1949 <sup>(5)</sup>	1963 <sup>(6)</sup>	1947 <sup>(1)</sup>	1951 <sup>(1)</sup>	1949 <sup>(4)</sup>	1947 <sup>(6)</sup>
6/Bloco 2	1992 <sup>(4)</sup>	1980 <sup>(5)</sup>	1976 <sup>(4)</sup>	1994 <sup>(8)</sup>	1980 <sup>(7)</sup>	1992 <sup>(7)</sup>
7/Bloco 2	1760 <sup>(2)</sup>	1768 <sup>(7)</sup>	1766 <sup>(5)</sup>	1763 <sup>(7)</sup>	1766 <sup>(6)</sup>	1763 <sup>(8)</sup>
8/Bloco 2	1787 <sup>(6)</sup>	1793 <sup>(8)</sup>	1785 <sup>(2)</sup>	1784 <sup>(6)</sup>	1784 <sup>(1)</sup>	1785 <sup>(1)</sup>

Fonte: os autores

Tabela 4 – Resultados de estricção em porcentagem (%)

Experimentos	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6
1/Bloco 1	50 <sup>(1)</sup>	51 <sup>(1)</sup>	51 <sup>(2)</sup>	50 <sup>(8)</sup>	50 <sup>(1)</sup>	50 <sup>(6)</sup>
2/Bloco 1	50 <sup>(4)</sup>	50 <sup>(7)</sup>	50 <sup>(3)</sup>	50 <sup>(7)</sup>	50 <sup>(4)</sup>	50 <sup>(2)</sup>
3/Bloco 1	58 <sup>(3)</sup>	58 <sup>(3)</sup>	58 <sup>(1)</sup>	58 <sup>(5)</sup>	58 <sup>(6)</sup>	58 <sup>(4)</sup>
4/Bloco 1	58 <sup>(2)</sup>	58 <sup>(8)</sup>	58 <sup>(8)</sup>	56 <sup>(6)</sup>	56 <sup>(8)</sup>	56 <sup>(5)</sup>
5/Bloco 1	53 <sup>(6)</sup>	53 <sup>(5)</sup>	53 <sup>(7)</sup>	53 <sup>(2)</sup>	53 <sup>(7)</sup>	53 <sup>(8)</sup>
6/Bloco 1	51 <sup>(5)</sup>	52 <sup>(4)</sup>	52 <sup>(4)</sup>	51 <sup>(3)</sup>	51 <sup>(3)</sup>	52 <sup>(3)</sup>
7/Bloco 1	58 <sup>(7)</sup>	58 <sup>(2)</sup>	56 <sup>(5)</sup>	58 <sup>(4)</sup>	56 <sup>(2)</sup>	56 <sup>(7)</sup>
8/Bloco 1	56 <sup>(8)</sup>	56 <sup>(6)</sup>	56 <sup>(6)</sup>	55 <sup>(1)</sup>	56 <sup>(5)</sup>	56 <sup>(1)</sup>
1/Bloco 2	42 <sup>(1)</sup>	41 <sup>(1)</sup>	42 <sup>(3)</sup>	42 <sup>(4)</sup>	42 <sup>(8)</sup>	41 <sup>(5)</sup>
2/Bloco 2	41 <sup>(7)</sup>	41 <sup>(4)</sup>	40 <sup>(6)</sup>	41 <sup>(2)</sup>	41 <sup>(3)</sup>	40 <sup>(2)</sup>
3/Bloco 2	47 <sup>(3)</sup>	46 <sup>(3)</sup>	46 <sup>(7)</sup>	47 <sup>(5)</sup>	47 <sup>(5)</sup>	46 <sup>(4)</sup>
4/Bloco 2	44 <sup>(8)</sup>	45 <sup>(2)</sup>	44 <sup>(8)</sup>	45 <sup>(3)</sup>	44 <sup>(2)</sup>	45 <sup>(3)</sup>
5/Bloco 2	56 <sup>(5)</sup>	42 <sup>(6)</sup>	56 <sup>(1)</sup>	56 <sup>(1)</sup>	56 <sup>(4)</sup>	56 <sup>(6)</sup>
6/Bloco 2	40 <sup>(4)</sup>	41 <sup>(5)</sup>	41 <sup>(4)</sup>	40 <sup>(8)</sup>	41 <sup>(7)</sup>	40 <sup>(7)</sup>
7/Bloco 2	46 <sup>(2)</sup>	47 <sup>(7)</sup>	47 <sup>(5)</sup>	46 <sup>(7)</sup>	47 <sup>(6)</sup>	46 <sup>(8)</sup>
8/Bloco 2	44 <sup>(6)</sup>	44 <sup>(8)</sup>	45 <sup>(2)</sup>	45 <sup>(6)</sup>	45 <sup>(1)</sup>	45 <sup>(1)</sup>

Fonte: os autores

Tabela 5 – Resultados de dureza (Dureza Brinell)

Experimentos	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6
1/Bloco 1	608 <sup>(1)</sup>	606 <sup>(1)</sup>	606 <sup>(2)</sup>	611 <sup>(8)</sup>	611 <sup>(1)</sup>	611 <sup>(6)</sup>
2/Bloco 1	608 <sup>(4)</sup>	608 <sup>(7)</sup>	608 <sup>(3)</sup>	608 <sup>(7)</sup>	608 <sup>(4)</sup>	608 <sup>(2)</sup>
3/Bloco 1	544 <sup>(3)</sup>	542 <sup>(3)</sup>	542 <sup>(1)</sup>	542 <sup>(5)</sup>	542 <sup>(6)</sup>	542 <sup>(4)</sup>
4/Bloco 1	544 <sup>(2)</sup>	544 <sup>(8)</sup>	542 <sup>(8)</sup>	550 <sup>(6)</sup>	550 <sup>(8)</sup>	550 <sup>(5)</sup>
5/Bloco 1	594 <sup>(6)</sup>	594 <sup>(5)</sup>	594 <sup>(7)</sup>	594 <sup>(2)</sup>	594 <sup>(7)</sup>	594 <sup>(8)</sup>
6/Bloco 1	603 <sup>(5)</sup>	600 <sup>(4)</sup>	600 <sup>(4)</sup>	603 <sup>(3)</sup>	603 <sup>(3)</sup>	600 <sup>(3)</sup>
7/Bloco 1	544 <sup>(7)</sup>	544 <sup>(2)</sup>	550 <sup>(5)</sup>	547 <sup>(4)</sup>	550 <sup>(2)</sup>	550 <sup>(7)</sup>
8/Bloco 1	550 <sup>(8)</sup>	550 <sup>(6)</sup>	550 <sup>(6)</sup>	553 <sup>(1)</sup>	550 <sup>(5)</sup>	550 <sup>(1)</sup>
1/Bloco 2	556 <sup>(1)</sup>	558 <sup>(1)</sup>	556 <sup>(3)</sup>	556 <sup>(4)</sup>	556 <sup>(8)</sup>	558 <sup>(5)</sup>
2/Bloco 2	558 <sup>(7)</sup>	558 <sup>(4)</sup>	561 <sup>(6)</sup>	558 <sup>(2)</sup>	558 <sup>(3)</sup>	561 <sup>(2)</sup>
3/Bloco 2	500 <sup>(3)</sup>	497 <sup>(3)</sup>	497 <sup>(7)</sup>	500 <sup>(5)</sup>	500 <sup>(5)</sup>	497 <sup>(4)</sup>
4/Bloco 2	508 <sup>(8)</sup>	503 <sup>(2)</sup>	508 <sup>(8)</sup>	503 <sup>(3)</sup>	508 <sup>(2)</sup>	503 <sup>(3)</sup>
5/Bloco 2	550 <sup>(5)</sup>	556 <sup>(6)</sup>	550 <sup>(1)</sup>	550 <sup>(1)</sup>	550 <sup>(4)</sup>	550 <sup>(6)</sup>
6/Bloco 2	564 <sup>(4)</sup>	558 <sup>(5)</sup>	558 <sup>(4)</sup>	564 <sup>(8)</sup>	558 <sup>(7)</sup>	564 <sup>(7)</sup>
7/Bloco 2	497 <sup>(2)</sup>	500 <sup>(7)</sup>	500 <sup>(5)</sup>	497 <sup>(7)</sup>	500 <sup>(6)</sup>	497 <sup>(8)</sup>
8/Bloco 2	506 <sup>(6)</sup>	506 <sup>(8)</sup>	503 <sup>(2)</sup>	503 <sup>(6)</sup>	503 <sup>(1)</sup>	503 <sup>(1)</sup>

Fonte: os autores

## 4.2. Modelagem estatística

A significância dos fatores foi testada por meio do método estatístico “t-student”, com um nível de 95% de confiança ( $p < 0,05$ ). Essa análise foi realizada separadamente para que pudesse ser verificada a significância dos fatores para cada uma das respostas das propriedades mecânicas estudadas, conforme mostrado nas Tabelas 6, 7 e 8. Para simplificação das tabelas, foram utilizadas letras para codificação dos fatores, sendo: fator velocidade (A); fator temperatura (B) e fator concentração do polímero (C).

Sendo ainda que, na Tabela 6, os “Termos” são os fatores e interações testadas; o “Efeito” são os parâmetros calculados para cada fator e interação, por meio de estatística t-student. Ainda, o “Coeficiente” corresponde à metade do valor do efeito (utilizado para modelagem por meio de Regressão Linear Múltipla), “T” corresponde ao parâmetro de comparação para verificação da significância do fator ou interação e “p” corresponde ao parâmetro de significância comparada a 0,05 (para 95% de confiança, teste padrão).

Utilizando os coeficientes calculados através dos testes de significância (apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8), foi possível a construção de modelos estatísticos que representam a relação entre as variáveis de entrada do processo (fatores) e as variáveis de saída (propriedades mecânicas).

Tabela 6 – Teste de significância, diâmetro 2,00 mm, para limite de resistência à tração (em MPa)

Termos	Efeito	Coeficiente	T	pp
Constante		2036	2141,84	0,000
(A)	12,2	6,10	6,44	0,000
(B)	-202	-101,0	-106,25	0,000
(C)	-10,7	-5,30	-5,61	0,000
(A)(B)	-0,50	-0,30	-0,26	0,794
(A)(C)	5,50	2,80	2,89	0,006
(B)(C)	26,1	13,04	13,72	0,000
(A)(B)(C)	-6,80	-3,40	-3,55	0,001

Fonte: os autores

Tabela 7 – Teste de significância, diâmetro 2,00 mm, para estricção (em porcentagem)

Termos	Efeito	Coeficiente	T	p
Constante		54,083	598,72	0,000
(A)	-1,0	-0,50	-5,54	0,000
(B)	5,75	2,875	31,83	0,000
(C)	0,50	0,25	2,77	0,009
(A)(B)	-0,083	-0,042	-0,46	0,647
(A)(C)	-0,33	-0,1667	-1,85	0,072
(B)(C)	-1,583	-0,7917	-8,76	0,000
(A)(B)(C)	0,25	0,125	1,38	0,174

Fonte: os autores

Tabela 8 – Teste de significância, diâmetro 2,00 mm, para dureza (em HB)

Termos	Efeito	Coefficiente	T	p
Constante		574,92	1943,57	0,000
(A)	3,50	1,75	5,92	0,000
(B)	-56,33	-28,17	-95,22	0,000
(C)	-3,08	-1,54	-5,21	0,000
(A)(B)	0,17	0,08	0,28	0,780
(A)(C)	1,75	0,87	2,96	0,050
(B)(C)	7,58	3,79	12,82	0,000
(A)(B)(C)	-2,42	-1,21	-4,08	0,001

Fonte: os autores

$$LR = 2036 + 6,1(A) - 101(B) - 5,3(C) + 2,8(A)(C) + 13(B)(C) - 3,4(A)(B)(C) \quad (2)$$

$$E = 54,08 - 0,5(A) + 2,875(B) + 0,25(C) - 0,7917(B)(C) \quad (3)$$

$$D = 574,92 + 1,75(A) - 28,17(B) - 1,54(C) + 0,87(A)(C) + 3,79(B)(C) - 1,21(A)(B)(C) \quad (4)$$

onde: LR: corresponde à variável resposta limite de resistência à tração;

E: corresponde à variável resposta estrição;

D: corresponde à variável resposta dureza.

Tabela 9 – Teste de significância, diâmetro 6,50 mm, para limite de resistência à tração (em MPa)

Termos	Efeito	Coefficiente	T	p
Constante		1874,54	2373,11	0,000
(A)	22,58	11,29	14,29	0,000
(B)	-195,08	-97,54	-123,48	0,000
(C)	-5,42	-2,71	-3,43	0,001
(A)(B)	-0,58	-0,29	-0,37	0,714
(A)(C)	5,75	2,87	3,64	0,001
(B)(C)	2,08	1,04	1,32	0,195
(A)(B)(C)	-5,75	-2,88	-3,64	0,001

Fonte: os autores

Tabela 10 – Teste de significância, diâmetro 6,50 mm, para estrição (em porcentagem)

Termos	Efeito	Coefficiente	T	p
Constante		44,833	149,21	0,000
(A)	-4,5	-2,25	-7,49	0,000
(B)	1,417	0,708	2,36	0,023
(C)	3,0	1,50	4,99	0,000
(A)(B)	2,583	1,292	4,30	0,000
(A)(C)	-3,0	-1,5	-4,99	0,000
(B)(C)	-2,917	-1,458	-4,85	0,000
(A)(B)(C)	3,083	1,542	5,13	0,000

Fonte: os autores

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

$$E = 44,833 - 2,25(A) + 0,708(B) + 1,5(C) + 1,292(A)(B) - 1,5(A)(C) - 1,458(B)(C) + 1,542(A)(B)(C) \quad (6)$$

$$D = 529,27 + 3,10(A) - 27,65(B) - 0,65(C) + 0,77(A)(C) + 0,27(B)(C) - 1,15(A)(B)(C) \quad (7)$$

Os diferentes diâmetros foram tratados de forma separada, ou seja, primeiramente foram criados os modelos referentes ao diâmetro 2,00 mm e em seguida os modelos atribuídos ao diâmetro 6,50 mm. A seguir, serão apresentados nas equações 2, 3 e 4, os modelos estatísticos criados para o diâmetro 2,00 mm:

Através dos testes de significância realizados, para as propriedades mecânicas mostradas nas Tabelas 9, 10 e 11, em relação ao diâmetro 6,50 mm, foi possível a criação de modelos estatísticos para esse diâmetro.

Tabela 11 – Teste de significância, diâmetro 6,50 mm, para dureza (em HB)

Termos	Efeito	Coefficiente	T	p
Constante		529,27	1739,09	0,000
(A)	6,21	3,10	10,20	0,000
(B)	-55,29	-27,65	-90,84	0,000
(C)	-1,29	-0,65	-2,12	0,040
(A)(B)	0,04	0,02	0,07	0,946
(A)(C)	1,54	0,77	2,53	0,015
(B)(C)	0,54	0,27	0,89	0,379
(A)(B)(C)	-2,29	-1,15	-3,77	0,001

Fonte: os autores

A seguir, são apresentados nas equações 5, 6 e 7, os modelos estatísticos criados para o diâmetro 6,50 mm:

### 4.3 Otimização das múltiplas respostas

Para a otimização do processo, primeiramente foi necessária a definição das especificações requeridas para as propriedades mecânicas estudadas. Para isso, foram analisados os blocos (fator diâmetro) separadamente, ou seja, otimizaram-se as variáveis respostas, primeiramente, para o arame com diâmetro 2,00mm e,

posteriormente, realizou-se o mesmo procedimento para o diâmetro 6,5 mm.

As especificações (mínima, nominal e máxima) referentes ao diâmetro 2,00 mm são apresentadas na Tabela 12. Nesse caso, também se buscam valores nominais (alvo) para todas as propriedades mecânicas (as especificações são fixas e foram estabelecidas pela empresa financiadora do projeto).

Tabela 12 – Especificações para diâmetro 2,00 mm

Limite de resistência à tração (MPa)			Estricção - (%)			Dureza - (HB)		
Mínima	Nominal (alvo)	Máxima	Mínima	Nominal (alvo)	Máxima	Mínima	Nominal (alvo)	Máxima
1930	2040	2150	40	47	55	545	572	600

Fonte: os autores

Tabela 13 – Especificações para diâmetro 6,50 mm

Limite de resistência à tração (MPa)			Estricção - (%)			Dureza - (HB)		
Mínima	Nominal (alvo)	Máxima	Mínima	Nominal (alvo)	Máxima	Mínima	Nominal (alvo)	Máxima
1770	1875	1980	40	48	56	500	530	560

Fonte: os autores.

Na Tabela 13, são mostradas as especificações (mínima, nominal e máxima) referentes ao diâmetro 6,50 mm. Também se buscam valores nominais (alvo) para as propriedades mecânicas.

### 4.4 Método Simplex para otimização das múltiplas respostas

#### 4.4.1 Aplicação para o diâmetro 2,00 mm

Buscou-se a otimização do processo através da aplicação do método simplex (por programação linear), por meio da ferramenta Solver, que é um complemento do software Excel, versão 2010.

Para a aplicação deste método foi necessário a definição das:

1. Especificações: para otimização do diâmetro de 2,00 mm (apresentadas na Tabela 12); em que se busca para a variável resposta limite de resistência à tração valores entre 1930MPa a 2150 MPa, para estricção valores entre 40% a 55% e para dureza valores entre 545 HB a 600 HB (essas especificações serão inseridas em forma de restrições);
2. Variáveis de decisão: neste caso, refere-se aos valores de ajustes dos fatores A, B e C, para que seja proporcionada a melhor condição de atendimento das especificações das múltiplas respostas das propriedades mecânicas.

3. Função objetivo: É a média da distância que foi alcançada na predição de cada variável resposta em comparação à sua especificação nominal, em porcentagem (%), ou seja, para cada resposta predita pelo modelo, subtrai-se o valor “alvo” e então se obtém uma unidade de erro entre a predição e a especificação nominal. Neste caso, a função objetivo será a minimização da média desses “erros”, buscando assim uma condição que reduza ao máximo os valores das distâncias simultaneamente, proporcionando o melhor atendimento das especificações nominais, através dos melhores ajustes dos fatores.

Com a utilização do solver (aplicando o método *Simplex*) e através de uma planilha contendo um sistema lógico que tornou possível considerar todas as restrições, variáveis de decisão e função objetivo, pôde-se obter os resultados apresentados na Tabela 14, contendo as melhores respostas alcançadas através da otimização.

Para isso, foi utilizado o modelo estatístico obtido anteriormente através de regressão linear múltipla, conforme equações 2, 3 e 4.

Observou-se que ao ajustar os fatores nas configurações mostradas na Tabela 14, em que A= 1; B= 0,042 e C= -1; foi possível a obtenção de variáveis respostas para as suas respectivas especificações, com erro médio de 4,8% (média dos erros das propriedades mecânicas, em porcentagem).



Tabela 14 – Simulação usando o modelo matemático (diâmetro 2,00 mm)

Resposta	Constante do modelo	Fatores							Respostas obtidas	Erro (%)	Erro médio
		A	B	C	AB	AC	BC	ABC			
Tração	2036	6,1	-101	-5,3	--	2,8	13	-3,4	2040	0,00	
Estricção	54,08	-0,5	2,875	0,25	--	---	-0,7917	---	53,5	13,83	4,8 %
Dureza	574,92	1,75	-28,17	-1,54	--	0,87	3,79	-1,21	576,1	0,71	
Melhor ajuste		1	0,042	-1	--	--	-----	----	-----	----	----

Fonte: os autores.

#### 4.4.2 Aplicação para diâmetro (6,50 mm)

O método simplex também foi aplicado para o diâmetro 6,50 mm e as especificações foram as apresentadas na Tabela 13.

Para a aplicação deste método foi necessário a definição das:

1. Especificações: para o diâmetro 6,50 mm (apresentadas na Tabela 13); onde se busca para a variável resposta limite de resistência à tração valores entre 1770MPa a 1980 MPa, para estricção valores entre 40% a 56% e para dureza valores entre 500 HB a 560 HB. As especificações foram inseridas no solver conforme procedimento executado anteriormente.
2. Variáveis de decisão: neste caso, as variáveis de decisão são as mesmas utilizadas anteriormente para o diâmetro 2,00 mm e a sua inserção no solver segue

o mesmo procedimento realizado anteriormente.

3. Função objetivo: neste caso, a função objetivo foi a mesma executada para o outro diâmetro estudado e o procedimento de inserção no solver seguiu o mesmo procedimento detalhado anteriormente.

Utilizando as equações 5, 6 e 7, junto a aplicação do método *Simplex* (por meio do solver), foi possível se obter as melhores respostas para as propriedades mecânicas, referentes ao diâmetro 6,50 mm, que são mostradas na Tabela 15.

É possível observar que ao ajustar os fatores nas configurações mostradas na Tabela 15, em que A= -0,46; B= -0,1 e C= 0,8973; pôde-se obter variáveis respostas que atendem as suas respectivas especificações e o erro médio obtido foi 0,03%.

Tabela 15 – Simulação usando o modelo matemático (diâmetro 6,50 mm)

Resposta	Constante do modelo	Fatores							Respostas obtidas	Erro (%)	Erro médio
		A	B	C	AB	AC	BC	ABC			
Tração	1874,54	11,29	-97,54	-2,71	---	2,87	---	-2,88	1875,24	0,013	
Estricção	44,833	-2,250	0,708	1,5	1,29	-1,5	-1,458	-1,542	48	$5,23 \times 10^{-8}$	0,03%
Dureza	529,27	3,10	-27,65	-0,65	---	0,77	0,27	-1,15	529,6	0,083	
Melhor ajuste		-0,46	-0,1	0,8973	---	---	---	---	-----	-----	----

Fonte: os autores.

#### 4.5 Simulação de Monte Carlo para otimização das múltiplas respostas

Segundo Pamplona e Silva (2005), o Cristal Ball é um poderoso software de simulação e otimização baseado na modelagem de Monte Carlo, que roda em ambiente MS *Excel-Office*. Ele permite que os usuários analisem problemas em termos de faixas e distribuição em vez de ter um valor fixo. Através da utilização deste software o

comportamento de um sistema durante determinado tempo pode ser estudado, por meio de um modelo computacional. Esse modelo pode ser construído a partir de um conjunto de informações operacionais do sistema real, pois se torna muito complexo verificar um modelo dinâmico de forma empírica ou apenas observacional. Essa simulação permite uma maior aderência para o sistema ser modelado e está embutida na simulação a aleatoriedade (a parte estocástica do sistema).

#### 4.5.1 Aplicação para o diâmetro 2,00 mm

A simulação usando o método de Monte Carlo foi realizada através da utilização do *software Cristal Ball*, que é uma ferramenta complementar ao *software Excel*, versão 2010.

Primeiramente foi necessária a definição das variáveis de decisão, ou seja, os ajustes dos fatores que serão otimizados, dentro do intervalo  $[-1,+1]$ .

Em seguida foi necessária a definição da célula de “Previsão”, ou seja, a célula onde será inserida a função objetivo que deverá ser minimizada. Nesse caso, a função objetivo é a média da distância que foi alcançada na predição de cada variável resposta em comparação à sua especificação nominal, em porcentagem (%), ou seja, para cada resposta predita pelo modelo subtrai-se o valor “alvo”, então se obtém uma unidade de erro entre a predição e a especificação nominal. A função objetivo será a minimização da média desses “erros”, buscando assim, uma condição que reduza ao máximo os valores das distâncias simultaneamente.

Para utilização do otimizador “*OptQuest*” é necessário a definição dos objetivos. Configurou-se para “Minimizar” a função objetivo e definiu-se um valor máximo a ser alcançado, onde a função objetivo não deverá alcançar um erro maior que 10%, entre os valores preditos das variáveis respostas (utilizando os modelos estatísticos das equações 2, 3 e 4).

Neste caso, as restrições inseridas foram:

1. A variável limite de resistência à tração deverá estar entre 1930 MPa a 2150 MPa;
2. A variável estrição deverá estar entre 40 % a 55%;
3. A variável dureza deverá estar entre 545 HB a 600 HB.

As restrições relacionadas às especificações relatadas são as mesmas apresentadas anteriormente na Tabela 12, para o diâmetro 2,00 mm.

Foi necessário determinar o tempo das simulações de números aleatórios (ciclos) utilizando o método de Monte Carlo. Esse tempo está diretamente relacionado à quantidade de simulações executadas.

Na primeira simulação, utilizando o método de Monte Carlo, a configuração foi de 5 minutos (aproximadamente 700 simulações com números aleatórios) e todas as especificações foram atendidas. A função objetivo foi minimizada com 4,28%, ou seja, a média da

diferença entre os valores preditos das variáveis respostas e os valores especificados (nominais) foi de 4,28%.

Após a realização da primeira simulação, os valores encontrados para as múltiplas respostas foram: limite de resistência à tração de 2040 MPa, para estrição de 53,5% e para dureza de 576 HB. Os melhores ajustes para se obter esses valores são: fator A= 1,0; fator B=0,042; fator C=-1.

Em seguida, foram realizadas mais duas simulações. A primeira com 10 minutos (equivalente a 950 simulações) e a segunda com 20 minutos (equivalente a 1100 simulações), porém não se obteve nenhum melhoramento para otimização da função objetivo e, portanto, mantiveram-se os valores da primeira simulação.

#### 4.5.2 Simulação de Monte Carlo para o diâmetro 6,50 mm

A aplicação do método de Monte Carlo para o diâmetro 6,50 mm deu-se da mesma maneira que a aplicação para o diâmetro 2,00 mm. Seguiram-se os mesmos passos para inserção dos dados, porém para as especificações foram utilizados os valores apresentados na Tabela 13.

Nesse caso, as restrições foram:

1. A variável limite de resistência à tração deverá estar entre 1770 MPa a 1980 MPa;
2. A variável estrição deverá estar entre 40 % a 56%;
3. A variável dureza deverá estar entre 500 HB a 560 HB.

Após a realização da simulação (configurada para 5 minutos, aproximadamente 1000 ciclos) para o diâmetro 6,50 mm, revelou-se que as melhores respostas foram: limite de resistência à tração de 1875 MPa, 48% para estrição e para dureza de 530 HB. Os melhores ajustes para se obter esses valores são: fator A= -0,45; fator B= -0,1; fator C= 1.

Todas as especificações nominais foram atendidas e a função objetivo foi minimizada com 0,3%, ou seja, a média da diferença entre os valores preditos das variáveis respostas e os valores nominais especificados foi de 0,3%.

Foram realizadas mais duas simulações, a primeira com 10 minutos (equivalente a 1600 simulações) e a segunda com 20 minutos (equivalente a 1800 simulações), porém não se obteve valores melhores para otimização da função objetivo mantendo-se, portanto, os valores da primeira simulação.

#### 4.6 Análise comparativa entre os métodos de otimização

Na Tabela 16, em relação ao diâmetro 2,00mm, são mostrados os melhores ajustes dos fatores alcançados com a aplicação dos dois métodos. É possível observar que as configurações dos melhores ajustes, para os métodos *Simplex* e Simulação de Monte Carlo, são absolutamente os mesmos para o diâmetro 2,00 mm.

Analisando a Tabela 17, constatou-se que para o diâmetro 2,00 mm, as diferenças relativas à otimização entre os métodos de simulação aplicados não foi significativa. A diferença entre os erros é muito pequena, considerando que as variações dos equipamentos de medição

empregados superam esse valor. Também é importante ressaltar que essa medição do erro, entre os valores preditos e valores “alvos”, foi somente para verificar o quanto seria possível otimizar os ajustes dos fatores para que se aproximassem das especificações nominais (alvo) requeridas, pois no dia a dia da fabricação os “alvos” poderão ser buscados de acordo com a necessidade da empresa.

Tabela 16 – Ajustes alcançados para fatores, utilizando métodos de otimização (diâmetro 2,00mm).

Fatores	Métodos utilizados	
	Ajuste ( <i>Simplex</i> )	Ajuste (Monte Carlo)
A	1	1
B	0,042	0,042
C	-1	-1

Fonte: os autores.

Tabela 17 – Resultados alcançados, utilizando métodos de otimização (diâmetro 2,00 mm).

	Respostas ( <i>Simplex</i> )			Respostas (Monte Carlo)		
	Tração (MPa)	Estricção (%)	Dureza (HB)	Tração (MPa)	Estricção (%)	Dureza (HB)
Predição (por modelo estatístico)	2040	53,5	576	2040	53,5	576
Especificação mínima	1930	40	545	1930	40	545
Especificação máxima	2150	55	600	2150	55	600
Especificação (alvo)	2040	47	572	2040	47	572
Erro médio (%)		4,80			4,28	

Fonte: os autores

Na Tabela 18, em relação ao diâmetro 6,50 mm, são mostrados os melhores ajustes dos fatores alcançados com a utilização dos dois métodos de otimização.

É possível observar que as configurações dos melhores ajustes para os métodos *Simplex* e Monte Carlo possuem valores muito próximos. Analisando a Tabela 19, constatou-se que as diferenças relativas à otimização entre os métodos aplicados também não foi significativa para o diâmetro 6,50 mm, pois os dois métodos obtiveram erros muito próximos em relação à

especificação nominal, variando entre 0,03% a 0,17%, variação considerada pequena.

Tabela 18 – Ajustes alcançados para fatores, utilizando métodos de otimização (diâmetro 6,50mm).

Fatores	Métodos utilizados	
	Ajuste ( <i>Simplex</i> )	Ajuste (Monte Carlo)
A	-0,46	-0,45
B	-0,1	-0,1
C	0,8973	1

Fonte: os autores

Tabela 19 – Resultados alcançados, utilizando métodos de otimização (diâmetro 6,50 mm).

	Respostas ( <i>Simplex</i> )			Respostas (Monte Carlo)		
	Tração (MPa)	Estricção (%)	Dureza (HB)	Tração (MPa)	Estricção (%)	Dureza (HB)
Predição (por modelo estatístico)	1875,2	48	529,6	1875,08	48,2	529,6
Especificação mínima	1770	40	500	1770	40	500
Especificação máxima	1980	56	560	1980	56	560
Especificação (alvo)	1875	48	530	1875	48	530
Erro médio (%)		0,03			0,17	

Fonte: os autores.

## 5 Considerações finais

Concluiu-se que a metodologia de Delineamento de Experimentos aplicada no processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento em arames de aço SAE 9254 trefilado, com diâmetros de 2,00 mm a 6,50 mm, foi importante para revelar que os fatores diâmetro, velocidade, temperatura de revenimento e concentração do polímero têm influência significativa nas propriedades mecânicas limite de resistência à tração, estrição e dureza.

O planejamento de experimentos usado com dois níveis considerou que os resultados entre eles se comportam de forma linear, podendo assim ser modelado matematicamente pela metodologia Regressão Linear Múltipla, que se mostrou eficiente e cujos resultados foram utilizados na criação de dois modelos distintos, para os diferentes diâmetros.

Os modelos probabilísticos em conjunto com a aplicação dos métodos *Simplex* e Simulação de Monte Carlo, possibilitaram a otimização dos ajustes dos fatores de entrada do processo (por meio de simulações) o que, conseqüentemente, repercutirão em maior eficiência em relação ao atendimento das especificações, permitindo que através de simulações prévias de resultados, seja possível ajustar fatores de forma a atender precisamente as necessidades de produção, que têm relação direta com o ajuste do *setup* do forno de têmpera.

O ajuste adequado do *setup* do forno de têmpera, previamente simulado através dos métodos descritos nesta pesquisa, poderá provocar uma redução da quantidade de ensaios laboratoriais iniciais e tempo de espera desses resultados, cujo custo tem impacto direto nos indicadores financeiros da empresa. Tais custos são gastos em insumos para ensaios destrutivos, na disponibilidade reduzida de horas-máquina de trabalho devido ao tempo de parada aguardando resultados mecânicos e alocação de mão de obra destinada à preparação (*setup*) dos fornos. Todavia, além de afetar diretamente a produtividade, também afeta a qualidade do produto, pois sem uma simulação adequada de resultados, não é possível alcançar com frequência as especificações ideais das múltiplas respostas simultaneamente.

Concluiu-se através desta pesquisa, que o ponto ótimo do processo foi encontrado pelo método *Simplex*. Porém, qualquer um dos métodos de simulação estudados poderá ser utilizado, pois o método de simulação de Monte

Carlo também alcançou bons resultados em relação ao primeiro método aplicado. Pode-se, portanto, escolher qual o método a ser utilizado avaliando os recursos tecnológicos disponíveis pela empresa, que escolherá aquele que melhor atende as suas necessidades.

Para trabalhos futuros acha-se interessante comparar a eficácia destes modelos anteriormente apresentados, com os modelos obtidos por meio de outros métodos de otimização, tais como: *Desirability*, Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), algoritmo Genético (AG) e a Meta-heurística Recozimento Simulado, podendo assim, definir a modelagem e método de otimização mais adequado para esse processo.

## 6 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.
- BLONDEAU R., Ph. MAYNIER, DOLLET J., VIEILLARD-BARON - **Mathematical model for the calculation of mechanical properties of low-alloy steel metallurgical products: a few examples of its applications**, Bratec-3244, 2000.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 8. ed. New York: LTC, 2012. 724 p.
- CAMARÃO, A. F.- **Um modelo para previsão de tensões residuais em cilindros de aço temperados por indução**, 1v. 107p. Doutorado. Universidade de São Paulo – Engenharia Metalúrgica, 1998.
- CORRAR, L. J.; THEÓPHILO, C. **Pesquisa operacional para decisão em contabilidade e administração**, 1ª edição, Atlas, 2004.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2012. 600 p.
- DERRINGER, G., SUICH, R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables, *Journal of Quality Technology*, v 12, n 4, p.214-219, 1980.
- GORNI, A.A. - **Desenvolvimento de Aços Alternativos aos Materiais Temperados e Revenidos com Limite de Resistência entre 600 e 800 Mpa**, 1v. 155p. Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, ENGENHARIA MECÂNICA, 2001.
- Granato, D.; Branco, G. F.; Calado, V. M. A. Experimental design and application of response surface methodology for process modelling and optimization: A review, **Food Research International**, v.1, p. 0-14, 2011.
- HODGSON P.D; GIBBS R.K. - **A Mathematical Model to Predict the Mechanical Properties of Hot**

**Rolled C-Mn and Microalloyed Steels**”, vol.32 , por ISIJ International, 1992.

LIMA, V. B. S.; BALESTRASSI, P. P.; PAIVA, A. P. Otimização do desempenho de amplificadores de radiofrequência banda larga: uma abordagem experimental, **Produção**, v. 21, n. 1, p. 118-131, jan/mar, 2011.

MARINS, F. A. S. **Introdução à pesquisa operacional**, 1ª edição, editora Cultura Acadêmica, 2011, 11-25 p.

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

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G.C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**, 2ª edição, editora LTC, 2003, 230-320 p.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**.8.ed. New York: John Wiley & Sons, 2013. 203p.

PAIVA, E. J. **Otimização de Manufatura com Múltiplas Respostas baseadas em índices de capacidade**, Dissertação, Universidade Federal de Itajubá, 2008, 117 p.

PAMPLONA, E. O. ; SILVA, W. F. **Contribuição da Simulação de Monte Carlo na Projeção de Cenários para Gestão de Custos na Área de Laticínios**. In: IX Congresso Internacional de Custos, Florianópolis, SC, Brasil - 28 a 30 de novembro de 2005.

PAULA, R. F. V. **Fadiga de molas helicoidais de suspensão de automóveis**. 2013. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RIBEIRO, L. P. P.G. - **Caracterização das Propriedades Mecânicas do Aço SAE 4140 após Diferentes Tratamentos de Têmpera e Revenido**, 1v. 100p. Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - Engenharia Metalúrgica, 2006.

SILVA H. A.; SILVA M. B. Aplicação de um projeto de experimentos (DOE) na soldagem de tubos de zircaloy-4; **Produção & Engenharia**, v. 1, n. 1, p. 41-52, set./dez. 2008.

SODRÉ, M. **Sobre a episteme comunicacional. Matrizes**, São Paulo: USP, ano. 1, n. 1, p. 15-26, 2007.

STEIN, C. R. - **Efeito da rápida austenitização sobre as propriedades mecânicas de um aço C-Mn**, 1v. 73p. Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto – Engenharia de materiais, 2004.

Wang, J.; Wan, W. Application of desirability function based on neural network for optimizing biohydrogen production process, **international journal of hydrogen energy**, v.34, p. 1253-1259, 2009.